



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV MIKROELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF MICROELECTRONICS

3D TISKÁRNA TYPU DELTA

DELTA TYPE OF 3D PRINTER

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Radek Němec

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Petr Vyroubal, Ph.D.

BRNO 2019

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor **Mikroelektronika**

Ústav mikroelektroniky

Student: Bc. Radek Němec

ID: 173715

Ročník: 2

Akademický rok: 2018/19

NÁZEV TÉMATU:

3D tiskárna typu Delta

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Prostudujte výhody konstrukce 3D tiskárny typu Delta oproti konvenčním konstrukcím. Navrhněte její konstrukci s magnetickým hotendem a vytvořte její model v prostředí SolidWorks. Pro návrh topných částí využijte teplotní simulace. Ke zprovoznění použijte 32 bitovou elektroniku a modifikujte konvenční firmware.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle pokynů vedoucího práce

Termín zadání: 4.2.2019

Termín odevzdání: 21.5.2019

Vedoucí práce: Ing. Petr Vyroubal, Ph.D.

Konzultant:

doc. Ing. Lukáš Fucík, Ph.D.
předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

ABSTRAKT

Tématem této diplomové práce je návrh a konstrukce FDM delta 3D tiskárny obsahující 32bitovou elektroniku, magnetickou tiskovou hlavou a další potřebné periferie. Úvodní kapitoly se věnují teoretickému rozboru problematiky 3D tisku a jeho metod, popisem typů FDM 3D tiskáren a přehledem používaných plastů v FDM 3D tisku. Také je zde rozebrána používaná elektronika u 3D tiskáren a problematika přenosu tepla. V hlavní části práce je pak návrh a konstrukce delta 3D tiskárny a nezbytných periférií, včetně vytvoření jejího 3D modelu a aplikace 32bitové řídicí elektroniky. Pro vytvoření 3D modelu delta 3D tiskárny a navrhnu jejích topných částí je použit CAD systém SolidWorks. V poslední části této diplomové práce je samotné zprovoznění a kalibrace sestavené delta 3D tiskárny včetně ekonomického zhodnocení její výroby.

KLÍČOVÁ SLOVA

3D tisk, 3D tiskárna, 32bitová elektronika, delta 3D tiskárna, FDM, SolidWorks

ABSTRACT

This master thesis is about design and construction of FDM delta 3D printer which consists of 32-bit electronics, magnetics printer head and other necessary peripheries. Opening chapters of this thesis are about theory of 3D printing and its methods with description of FDM 3D printers and summarization of FDM plastic materials used for 3D printing. The next part is about used electronics and problematic of heat transfer. The main part of this thesis describes design and construction of 3D printer and its necessary peripheries, which includes creation of its 3D model and application for 32bit controller. 3D model of delta 3D printer and its heating components was created in CAD software SolidWorks. The last part includes description of commissioning and calibration of delta 3D printer with summarization of economic aspects of its creation.

KEYWORDS

3D print, 3D printer, 32-bit electronics, delta 3D printer, FDM, SolidWorks

NĚMEC, R. *3D tiskárna typu Delta*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2019. 79 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Petr Vyroubal, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svoji diplomovou práci na téma „3D tiskárna typu Delta“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne: 21. května 2019

.....
podpis autora

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Petru Vyroubalovi, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování práce.

V Brně dne: 21. května 2019

.....
podpis autora

Experimentální část této diplomové práce byla realizována na výzkumné infrastruktuře
vybudované v rámci projektu CZ.1.05/2.1.00/03.0072
Centrum senzorických, informačních a komunikačních systémů (SIX)
operačního programu Výzkum a vývoj pro inovace.

OBSAH

Úvod	10
1 3D tisk	11
1.1 Výhody a nevýhody 3D tisku.....	11
1.2 Využití 3D tisku	12
1.3 Výroba předmětů 3D tiskem (Rapid Prototyping)	13
1.4 Základní metody 3D tisku.....	14
1.4.1 Metoda FDM (Fuse Deposition Modeling).....	14
1.4.2 Metoda SLA (Stereolitografie).....	15
1.4.3 Metoda SLS (Selective Laser Sintering)	16
1.4.4 Další metody 3D tisku	17
2 Typy FDM 3D tiskáren.....	18
2.1 Kartézský typ 3D tiskáren	18
2.2 Delta 3D tiskárny	19
2.3 Polar 3D tiskárny.....	20
2.4 Scara 3D tiskárny	21
3 Materiály pro FDM 3D tisk	22
3.1 ABS (Akrylonitril butadien styren).....	22
3.2 PLA (Kyselina Polymléčná)	23
4 Teplo a principy jeho přenosu	25
5 Používaná elektronika u 3D tiskáren	27
6 Cíle diplomové práce	33
7 Praktická část diplomové práce.....	34
7.1 Použitá elektronika u delta 3D tiskárny	36
7.2 Návrh topných částí delta 3D tiskárny	43
7.2.1 Návrh tiskové hlavy.....	43
7.2.2 Návrh vyhřívané podložky	46
7.3 Výroba delta 3D tiskárny	50
7.4 Zprovoznění a kalibrace delta 3D tiskárny	53
6 Závěr	63

Literatura	65
Seznam symbolů, veličin a zkratk	69
Seznam obrázků	71
Seznam tabulek	73
A Kalibrační list delta 3D tiskárny	74
B Seznam tištěných dílů a rozpiska materiálu	76

Úvod

V dnešní době je 3D tisk velmi rychle rostoucím odvětví aditivního procesu výroby. V každodenním životě je možné na něj narazit stále častěji a v současnosti by se jen velmi těžko hledalo jakékoliv odvětví, kde by 3D tisk nebyl vůbec využíván. Od prvních 3D tiskáren používaných především pouze pro výrobu prototypů, prošla technologie 3D tisku značným vývojem. Postupně se tak stala mnohem dostupnější a levnější pro běžné lidi a taktéž se značně rozrostl sortiment tiskových materiálů, 3D tiskáren a jejich příslušenství. Díky tomu není pro běžného člověka v dnešní době problém si 3D tiskárnu sám vyrobit nebo si pořídit komerčně dostupný model.

Pro vlastní výrobu 3D tiskárny přispívá i skutečnost, že je k dispozici obrovské množství volně šiřitelných konstrukcí 3D tiskáren dostupných skrze specializované internetové komunity, plné lidí řešících obdobný problém nebo zajímavících se o problematiku 3D tisku. Není proto problém odsud získat velké množství rad a zkušeností, které napomohou k úspěšnému sestavení a zprovoznění 3D tiskárny. Při každé vlastní výrobě 3D tiskárny je však vždy nutné vyvinout určitou dávku kreativity a důvtipu při řešení problematiky její výroby, protože je nepsaným pravidlem, že téměř vždy dochází až už k chtěným či nechtěným úpravám volně šiřitelné konstrukce 3D tiskárny. Tedy každá vlastními silami vyrobená 3D tiskárna je svým způsobem originální.

Cílem této diplomové práce je navrhnout, sestavit, oživit a zkalibrovat FDM delta 3D tiskárnu s magnetickou tiskovou hlavou a dalšími potřebnými perifériemi, vybavenou 32bitovou řídicí elektronikou. Dále pak vytvořit její 3D model a navrhnout topné části pomocí CAD systému SolidWorks. Mimo to bude v úvodních kapitolách probrána problematika 3D tiskáren a metod 3D tisku včetně zvolených plastových tiskových materiálů, jejichž tisk by měla sestavená delta 3D tiskárna umožňovat.

Výstupem diplomové práce pak bude sestavená FDM delta 3D tiskárna, jež prošla procesem kalibrace a je tak připravena pro budoucí použití. Diplomová práce bude rovněž doplněna dokumentací z výroby FDM delta 3D tiskárny.

1 3D tisk

3D tisk, někdy také nazývaný jako Rapid Prototyping [1], je aditivní proces výroby, při němž vzniká požadovaný trojrozměrný předmět, respektive součástka, postupným vrstvením tenkých vrstev materiálu. Jako aditivní proces je 3D tisk označován především proto, že nedochází k odebírání nepotřebného materiálu například frézováním či soustružením jako v případě subtraktivního procesu, až do chvíle, dokud není požadovaný předmět vytvořen, ale naopak je materiál již od začátku postupně přidáván. Díky tomu nejsou pro výrobu předmětu, kromě 3D tiskárny, vyžadovány další nástroje. Navíc vytvářený předmět může být téměř jakéhokoliv tvaru. [2, 3]

1.1 Výhody a nevýhody 3D tisku

Mezi výhody 3D tisku patří bezesporu menší spotřeba materiálů na vytvoření stejného předmětu než v případě subtraktivních technologií. V mnoha případech je i výroba složitých předmětů značně jednodušší a je při ní potřeba daleko méně výrobních operací. S tím spojená cena výrobku nezávisí na jeho složitosti, ale pouze na množství použitého materiálu a samozřejmě spotřebované elektrické energii 3D tiskárnou. Taktéž počáteční náklady na výrobu jsou velmi nízké. Není třeba pořizovat například drahé vstřikovací lisy, obráběcí stroje a další specializované zařízení a nástroje. Celý proces výroby zde obstarává pouze vhodná 3D tiskárna s minimem dalších nástrojů. Další výhodou je možnost snadné úpravy tisknutého předmětu změnou jeho 3D modelu, což vnáší do procesu 3D tisku značnou variabilitu a je možné, aby každý předmět byl individuálně přizpůsoben podle potřeb. Zároveň pokud je tomu 3D tiskárna uzpůsobena, je i velmi snadná změna materiálu výrobku, případně i možná kombinace více materiálů. Navíc paleta nabízených materiálů je dnes už velmi široká. Z uvedených výhod je zřejmé, že významnou funkci zastává 3D tisk ve výrobě prototypů, která je díky tomu levnější, rychlejší a daleko flexibilnější co se změn prototypů výrobku týče, než v případě že by se použila jiná technologie. [3, 4]

Po uvedení výhod 3D tisku je nutné zmínit i jeho nevýhody. Jednou z nevýhod je značná anizotropnost vytištěného plastového materiálu v důsledku toho, že celý předmět je tisknut, jak již bylo řečeno, po jednotlivých vrstvách. V jednom směru tedy snese až o 50 % nižší silové zatížení než v ostatních směrech. U kovového tištěného materiálu je však situace zcela opačná. Součásti vytvořené pomocí některých technik kovového 3D tisku jsou velmi odolné, a naopak se zde počítá s použitím ke kritickým aplikacím. Další nevýhoda 3D tisku plyne ze sériové výroby ve velkém objemu. Zde se již 3D tisk ukazuje jako neekonomicky a pomalý ve srovnání s tradičními metodami, jakožto například obráběním či vstřikováním, kde se počáteční vysoké náklady rozpočítají mezi velký počet kusů výrobku a s objemem výroby dále rychle klesají. Velkou nevýhodou 3D tisku je omezená tolerance a přesnost výsledného výrobku. Ta je dána především konstrukcí 3D tiskárny, technologií tisku, kalibrací tiskárny a dalšími nezanedbatelnými vlivy. Většinou se přesnost vytištěného předmětu

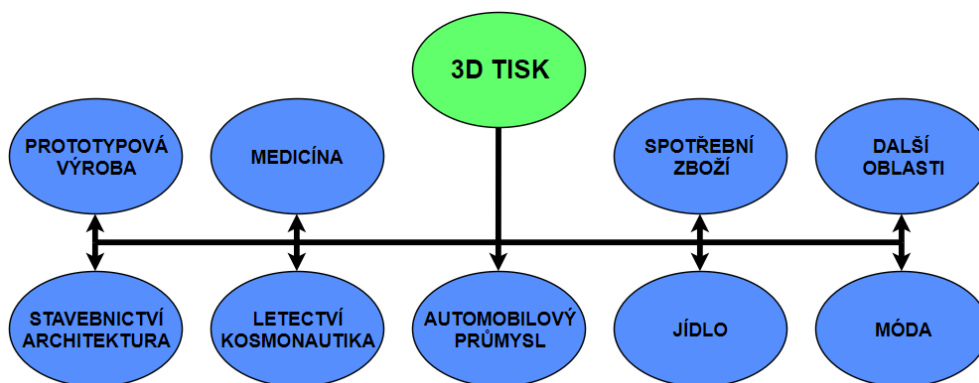
pohybuje přibližně od $\pm 0,5$ mm až do $\pm 0,01$ mm u nejlepších 3D tiskáren a technologií 3D tisku. [3] Nevýhodou zejména u plastového 3D tisku je častokrát nutnost použití tzv. opor, bez kterých by nebyl požadovaný předmět vytisknutelný. S tím souvisí i další nevýhoda, kdy po odstranění těchto opor zůstávají na povrchu předmětu nečistoty či otřepy a je zapotřebí dalšího opracování povrchu. Mezi další nevýhody 3D tisku patří vysoká spotřeba elektrické energie 3D tiskáren, možnost uvolňování škodlivých látek vlivem tavení materiálu při tisku a v neposlední řadě také, že ne všechny 3D tiskárny jsou uživatelsky přívětivé. Uvedené výhody a nevýhody jsou shrnuty v následující tabulce tab. 1. [3, 5]

Tab. 1: Shrnutí výhod a nevýhod 3D tisku.

<u>Výhody 3D tisku</u>	<u>Nevýhody 3D tisku</u>
Spotřeba materiálu	Anizotropnost vytištěného předmětu
Jednodušší výroba složitých předmětů	Neekonomický a pomalý ve velkovýrobě
Méně výrobních operací	Omezená tolerance a přesnost
Nízké počáteční náklady na výrobu	Nutnost použití tzv. opor
Velká flexibilita tisku	Většinou nutnost dalšího opracování
Široká paleta tiskových materiálů	Uvolňování škodlivých látek během tisku
	Může být uživatelsky nepřívětivý

1.2 Využití 3D tisku

Jak již bylo zmíněno, 3D tisk se zezáčátku používal především v prototypové výrobě. Postupně se však díky snížení ceny a zlepšení dostupnosti této technologie, stal nedílnou součástí řady odvětví. Pro lepší představu jsou nejvýznamnější odvětví, ve kterých se 3D tisk používá, uvedena na obr. 1. [2]



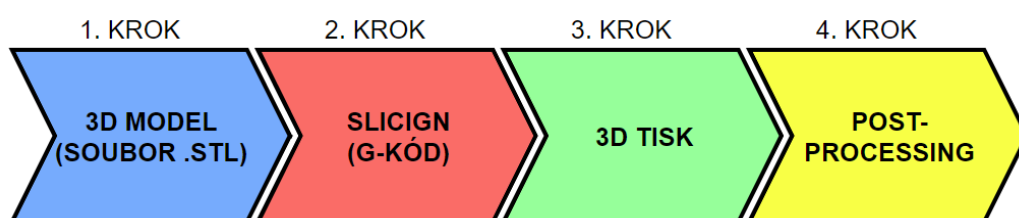
Obr. 1: Příklad odvětví, v nichž se používá 3D tisk.

V dnešní době je možné se s 3D tiskem setkat od samotné prototypové výroby, přes malosériovou neboli kusovou výrobu, až po výrobu spotřebního zboží. Další významnou oblastí, kde našel 3D tisk díky své flexibilitě velké využití, je letectví a kosmonautika, respektive vesmírný průmysl. Zde se do budoucna dokonce počítá s tím, že by pomocí 3D tiskáren mohly být tištěny předměty přímo z materiálů jež tvoří planety. [2] Mimo jiné, se k podobným účelům začínají experimentálně používat

i 3D tiskárny ve stavebnictví a architektuře. To nejenom pro výrobu modelů budov ale i také jejich částí nebo celků v reálné velikosti. [6] Již trochu tradiční oblastí 3D tisku je automobilový průmysl. Do těch však méně tradičních oblastí patří například výroba jídla nebo oblečení. V neposlední řadě je 3D tisk vynikajícím pomocníkem v medicíně, kde pomocí něj mohou být kupříkladu tisknuty zubní náhrady nebo kostní implantáty a jeho využití se v této oblasti velmi rychle rozšiřuje. [7] Samozřejmě kromě těchto několika hlavních uvedených odvětví je nepočítatelně dalších, kde nachází 3D tisk rovněž své využití. [2]

1.3 Výroba předmětů 3D tiskem (Rapid Prototyping)

Při každém výrobě požadovaného předmětu pomocí 3D tisku je celý postup rozdělen do několika na sebe navazujících kroků. Většina kroků je u všech metod 3D tisku až na výjimky buď stejná anebo velmi podobná. Jediný krok, ve kterém se jednotlivé metody 3D tisku odlišují, je samotný tisk předmětu, jehož postup závisí na dané metodě. Jednotlivé kroky při výrobě předmětu pomocí 3D tisku jsou pro přehlednost uvedeny na obr. 2. Prvním krokem, jež je pro 3D tisk nezbytný je vytvoření 3D modelu předmětu, k čemuž slouží nespočetná řada CAD systémů. Alternativní možností může být použití 3D scanneru v případě, že daný předmět má již svou reálnou hmotnou předlohu. Těmito způsoby vytvořený 3D model je nejčastěji uložen do formátu STL. Následně je v dalším kroku 3D model pomocí jiného softwaru rozsekán na jednotlivé vodorovné vrstvy (tzv. slicing) tak, aby pak mohl být 3D tiskárnou vytištěn. Výstupem tohoto kroku je převedení takto rozřezaného 3D modelu do strojového jazyka (G-kódu). V tomto strojovém jazyce jsou obsaženy konkrétní souřadnice, kterými se řídí 3D tiskárna. [2, 3, 8]



Obr. 2: Postup výroby pomocí 3D tisku.

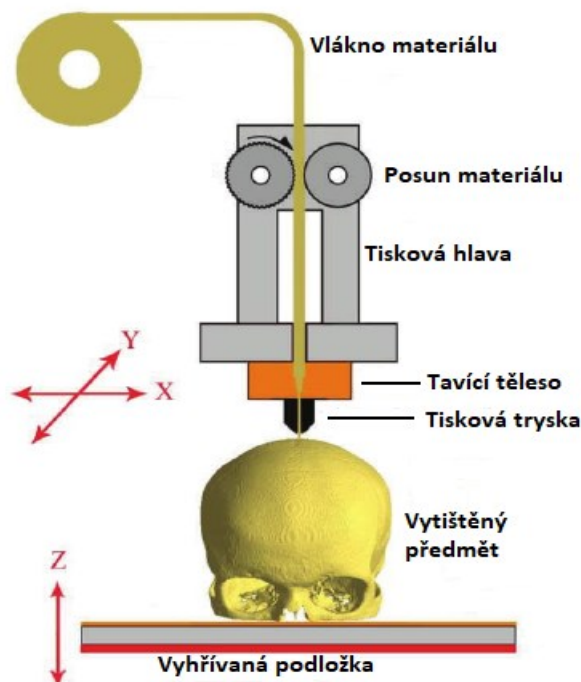
Samotný proces tisku předmětu je pak odlišný v závislosti na použité metodě 3D tisku. Tyto zmíněné metody 3D tisku budou dále popsány následující kapitolou. Volba metody 3D tisku mimo jiné závisí na použitém tiskovém materiálu, kterých existuje rovněž celá řada. Posledním krokem je tzv. post-processing, což znamená, že vytvořený objekt je očištěn od přebytečného materiálu či opor, a následně je v nezbytných případech provedeno další opracování jeho povrchu. [2, 3, 8]

1.4 Základní metody 3D tisku

Metod 3D tisku existuje celá řada, jednotlivé metody se však kromě svého principu od sebe odlišují mimo jiné cenou, nároky na vybavení, rychlostí a kvalitou tisku, spotřebou elektrické energie a dalšími parametry. Pro tisk kovových materiálů jsou využívány zejména metody na bázi tavení částic kovového prášku a jejich spékáním do větších celků. Jde zejména o metody SLM (Selective Laser Melting) a DMLS (Direct Metal Laser Sintering). Alternativně lze taktéž částice kovu spojovat pojivem, jak je tomu u metody Binder Jetting. [9] U plastového 3D tisku je paleta metod 3D tisku ještě značně rozmanitější. Kromě tavení částic tiskového prášku laserem se zde například používá princip polymerace metodou stereolitografie (SLA), či velmi často roztavení tiskové struny (filamentu) pomocí topného tělesa v případě metody FDM (Fuse Deposition Modeling). Princip metody FDM je pro tuto práci stěžejní. V následujících podkapitolách je popsán princip několika základních metod plastového 3D tisku. [2]

1.4.1 Metoda FDM (Fuse Deposition Modeling)

Metoda FDM je nejběžněji používanou metodou 3D tisku. Její princip byl objeven v 80. letech 20. století a následně patentován americkou společností Stratasys Inc. V dnešní době je možné se s touto metodou taktéž setkat pod názvem FFF (Fused Filament Fabrication). Principu 3D tisku pomocí metody FDM je uveden na obr. 3. [2]



Obr. 3: Princip metody FDM. [10]

Tiskový materiál je při této metodě 3D tisku používán ve formě vlákna (filamentu). To je postupně odvíjeno z cívky za pomoci podavače a vháněno do tiskové hlavy. Tisková hlava pak tento pevný materiál taví, reguluje jeho teplotu a následně i tok

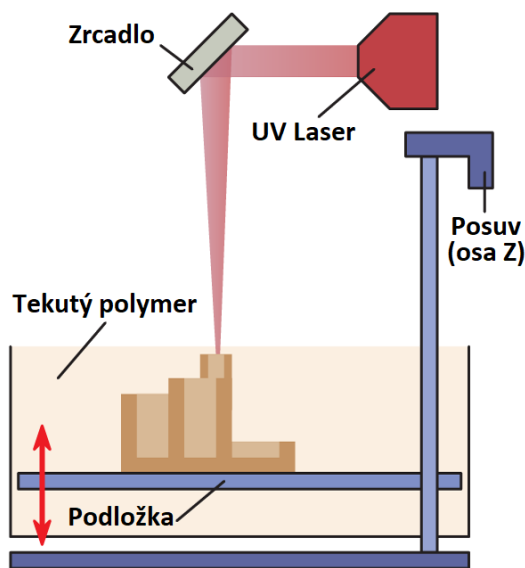
pomocí tiskové trysky. Takto roztavený materiál je z tiskové trysky vytlačován a následně pak pohyby tiskové hlavy anebo podložky vrstven na tiskovou podložku čímž je vytvářen požadovaný předmět. V tomto případě k vytvrzení materiálu dochází ihned po natisknutí. Při použití některých materiálů je však nutné, aby si již natištěné vrstvy materiálu udržovaly požadovanou teplotu kvůli dobrému spojení s dalšími vrstvami. Stejně tak je nutné, aby tisková podložka měla definovanou teplotu kvůli přichycení tištěného předmětu k podložce. Proto bývá tisková podložka ve většině případů vyhřívaná. Mezi nejčastěji používané materiály v této metodě 3D tisku patří termoplastické polymery například vlákno ABS (Akrylonitril butadien styren), vlákno PLA (kyselina polymléčná) anebo PETG (Polyethylentereftalát-glykol). [2, 11]

Co se týče tloušťky jedné nanesené vrstvy materiálu, ta se nejčastěji pohybuje mezi 0,05 mm až 0,4 mm. Při některých aplikacích může být po dokončení tisku vyžadováno dodatečných úprav povrchu materiálu, jako je například broušení či leštění. [2, 11]

Jednoznačnou výhodou této metody tisku jsou nejnížší náklady na výtisk a nejlepší cena a dostupnost technologie. Taktéž je k dispozici široká škála tiskových materiálů. Za nevýhodu lze naopak považovat nejnížší rozměrovou přesnost a rozlišení detailů, viditelnost jednotlivých vrstev a taky to, že díky principu této metody 3D tisku je vytištěný předmět značně anizotropní. [2, 11]

1.4.2 Metoda SLA (Stereolitografie)

Další používanou a zároveň nejstarší metodou 3D tisku je metoda SLA (Stereolitografie). Při ní je předmět vytvářen postupným vytvrzováním tekuté fotopolymerní pryskyřice v jednotlivých vrstvách. To se děje za použití ultrafialového (UV) laseru. Po vytvrzení požadované vrstvy dochází k posunu tiskové podložky a následně na tuto vrstvu je tištěna další vrstva. Po vytištění objektu je většinou nutné jej ještě dále vytvrdit v UV světle, aby byly zajištěny požadované mechanické vlastnosti. Princip této metody 3D tisku je znázorněn na obr. 4. [12, 13]

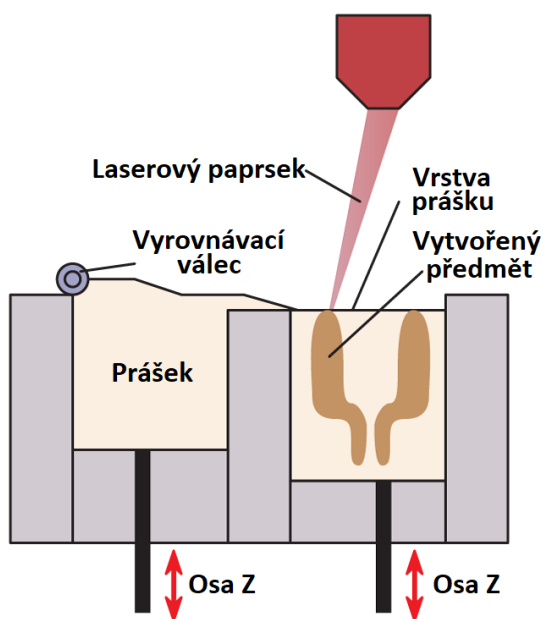


Obr. 4: Princip metody SLA. [12]

Co se týče přesnosti vytištěného předmětu, jedná se v tomto případě o nejpřesnější metodu 3D tisku, která umožňuje tisknout velmi přesné a detailní předměty, navíc bez nutnosti dalších úprav jejich povrchů. Nevýhodami naopak jsou křehkost a náchylnost na zhoršení mechanických a vizuálních vlastností předmětů, pokud jsou vystaveny slunečnímu záření. Dále pak nutnost použití podpůrných konstrukcí a v poslední řadě také i poměrně vysoká cena výtisku a tiskárny. [12, 13]

1.4.3 Metoda SLS (Selective Laser Sintering)

S další metodou, se kterou je možné se u 3D tisku setkat, je metoda SLS. Její princip je obdobný jako u už zmiňovaných metod SLM a DLMS kovového 3D tisku. Předmět je postupně tvořen z prášku termoplastických polymerů, který je v požadovaných místech po vrstvách spékán laserem. Poté co je vytvořena jedna požadovaná vrstva předmětu, je tisková podložka posunuta, a na již vytvořenou vrstvu předmětu je nanесena další vrstva prášku ze zásobníku. Prášek tiskového materiálu je v zásobníku udržován zahřátý na teplotě těsně pod jeho bodem tavení. Celý proces se pak opakuje do té doby, než vznikne požadovaný předmět. Následně je však potřeba nechat předmět, jež je zasypán v nespojeném prášku, vychladnout a až poté je možno jej očistit. Princip 3D tisku touto metodou je znázorněn na obr. 5. [12, 14]



Obr. 5: Princip metody SLS. [12]

Tato metoda 3D tisku je často využívána pro výrobu funkčních součástí díky své přesnosti. Narozdíl od metody FDM mají předměty vyrobené touto metodou vlastnosti stejné ve všech směrech. Nevýhodami jsou naopak poměrně vysoká cena SLS 3D tiskáren a dále pak zrnitost povrchu či náchylnost velkých ploch tisknutého předmětu k deformaci. [12, 14]

1.4.4 Další metody 3D tisku

Mezi další metody 3D tisku patří například metoda Material Jetting (MJ), při níž je objekt tisknut tekutým materiálem pomocí nástřiku kapek podobně jako u inkoustové tiskárny. Takto vytvořený předmět je následně vytvrzen pomocí UV světla. Další podobnou metodou 3D tisku je Binder Jetting (BJ), kde se při tisku používají dva materiály, a to tekuté pojivo a základní práškový materiál. Jinou alternativní metodou 3D tisku je metoda LOM (Laminace vrstev) v níž je tisknutý objekt vytvářen z předpřipravených vrstev, které jsou k sobě spojovány pomocí působení tlaku. Samozřejmě metod 3D tisku a jejich modifikací existuje nespočet, pro účely této diplomové práce je však důležitý princip metod uvedených v předchozích třech kapitolách. [2, 3]

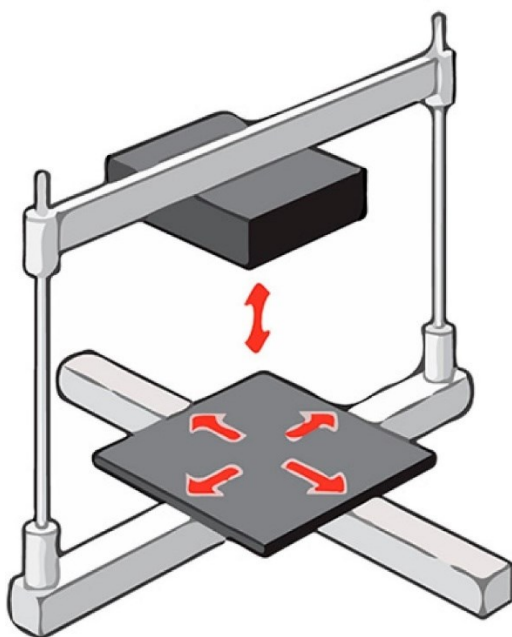
2 Typy FDM 3D tiskáren

Od dob vyrobení první komerční 3D tiskárny vzniklo nespočet dalších různorodých konstrukcí 3D tiskáren, které se od sebe více či méně odlišují. V současné době je k dispozici taktéž celá řada volně šiřitelných konstrukcí na různých internetových fórech či v komunitách. Jedním takovým je poměrně známý projekt RepRap [15], ve kterém jsou volně dostupné různé konstrukce 3D tiskáren včetně jejich modelů a potřebného softwaru, podpořené poměrně velkou komunitou dalších uživatelů.

Všechny FDM 3D tiskárny se však dělí do čtyř základních skupin podle toho, jakým se řídí souřadnicovým systémem. Rozlišujeme zde tiskárny kartézského typu, dále typu delta, polar a scara. Konstrukce těchto 3D tiskáren včetně jejich příkladů jsou uvedeny v následujících kapitolách. [16]

2.1 Kartézský typ 3D tiskáren

Zdaleka nejrozšířenějšími a nejběžněji používanými jsou 3D tiskárny kartézského typu. Ty jsou pojmenovány podle kartézské soustavy souřadnic, ve které jsou souřadnice polohy udávány ve třech na sebe navzájem kolmých osách (X, Y, Z). U těchto 3D tiskáren se většinou tisková hlava pohybuje v osách X a Y a ve zbylé ose Z pak obstarává pohyb tisková podložka. Alternativně je taktéž někdy možné se setkat s pohybem tiskové hlavy pouze v jedné ose, kupříkladu v ose X s tím, že se pak tisková podložka pohybuje v osách Y a Z. V obou těchto případech jsou však k vytištění požadovaného objektu zapotřebí pouze souřadnice počátečních a koncových bodů jednotlivých drah tisku. Nákres kartézské 3D tiskárny je uveden na obr. 6. V současnosti se taktéž pomalu začínají rozvíjet kartézské 3D tiskárny typu CoreXY [15], které jsou však prozatím stále spíše ve fázi vývoje. [17, 18]



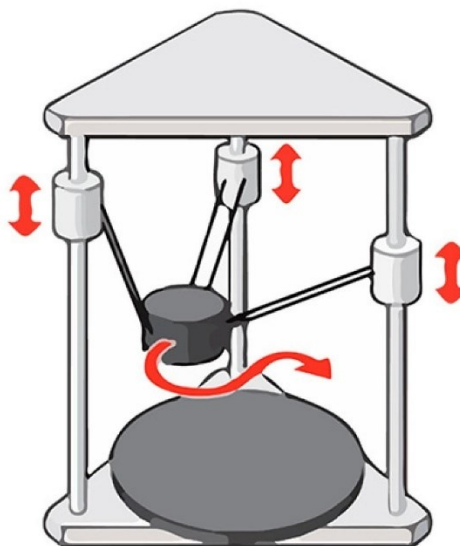
Obr. 6: Kartézský typ 3D tiskárny. [19]

Výhodou tohoto typu 3D tiskáren je již zmíněná velká rozšířenost. Většinou jsou tyto 3D tiskárny také levnější a snadno sestavitelné a pokud je potřeba, jsou lehce přenositelné. Dále mají kvalitnější povrch vytištěného objektu. [17, 18]

Jednou z nevýhod těchto 3D tiskáren je velká váha pohybující se tiskové hlavy. Z toho důvodu je i potřebná větší síla na rozpohybování a zastavení jejich tiskové hlavy a není tak možná okamžitá změna směru tisku. V důsledku toho vznikají nepřesnosti na tištěném předmětu. Vychází z toho také další nevýhoda, kterou je nemožnost tisku vysokých objektů, u nichž by se tyto chyby tisku díky jejich výšce o to více projevíly. Navíc mnohdy díky své konstrukci nejsou k tisku vysokých či obecně objemných předmětů kartézské 3D tiskárny ani uzpůsobeny. [17, 18]

2.2 Delta 3D tiskárny

Jiným typem 3D tiskáren jsou delta 3D tiskárny. Ty pracují také v kartézské soustavě, ale na rozdíl od kartézských 3D tiskáren je zde použit odlišný systém pro pohyb a umístění tiskové hlavy v prostoru. Další velkou odlišností je jejich samotná konstrukce, viz obr. 7. Tisková hlava je v jejich případě uchycena na třech ramenech, které se mohou nezávisle na sobě pohybovat nahoru a dolů, díky tomu, že jsou každé zvlášť uchycené k lineárnímu pojezdu. Pro určení přesné polohy tiskové hlavy jsou u Delta 3D tiskáren použity trigonometrické funkce, jež jsou založeny na úhlech, které svírají ramena držící tiskovou hlavu. [17, 18]



Obr. 7: Delta 3D tiskárna. [19]

Nespornou výhodou delta 3D tiskáren je jejich poměrně velká rychlost tisku. K tomu je i uzpůsobena jejich tisková hlava a celé její uložení, tak aby bylo co nejlehčí a pro její rozpohybování a zastavení bylo za potřebí co nejméně síly. Co se týká přesnosti vytištěného předmětu, tak ta je také lepší než u kartézských 3D tiskáren, navíc tolik nezávisí na výšce tištěného předmětu. Další výhodou, která vychází z jejich konstrukce je možnost tisku vyšších předmětů, než je možné u většiny kartézských

3D tiskáren. Tisková podložka je u delta 3D tiskáren většinou kruhová, a tak pro její efektivní využití je vhodnější tisknout předměty kruhových tvarů. Taktéž složitost konstrukce těchto tiskáren je ve srovnání s kartézskými 3D tiskárnami menší a je tak pro jejich sestavení zapotřebí méně dílů. Stejně tak i jejich údržba je výrazně jednodušší. [17, 18]

Na druhou stranu delta 3D tiskárny tisknou s menšími detaily a povrch vytištěného předmětu je hrubší, než v případě že by byl předmět vytištěn kartézskou 3D tiskárnou. Další nevýhodou je použití bovdenové trubice pro přivádění tiskové struny do tiskové hlavy. Ta musí být použita z toho důvodu, protože krokový motor, který filament posouvá není z důvodu snížení hmotnosti tiskové hlavy umístěn přímo na ní, nýbrž je přichycen k nosné konstrukci 3D tiskárny. Díky tomu je omezen počet použitelných tiskových strun (filamentů). Taktéž uvnitř bovdenové trubice dochází ke tření tiskové struny o její stěnu. Delta 3D tiskárny jsou obvykle díky své typické konstrukci mnohem vyšší, než kartézské 3D tiskárny a vyžadují tak více místa. [17, 18]

2.3 Polar 3D tiskárny

Třetím typem 3D tiskáren je typ polar, který je oproti předešlým dvěma typům 3D tiskáren mnohem méně rozšířený a jedná se o zcela nově pojatý dizajn 3D tiskáren. Největší odlišností od předešlých typů 3D tiskáren je použití polární souřadnicové soustavy. Ta je sice podobná kartézské soustavě, avšak souřadnice polohy jsou udávány úhlem natočení a délkou ve dvou osách. 3D tiskárny tohoto typu mívají kruhovou otočnou tiskovou podložku, která obstarává kruhový pohyb, tj. úhel natočení. Zároveň se taktéž může u některých konstrukcí polárních 3D tiskáren pohybovat v ose Y. Zbýlý pohyb v ose Z pak obstarává samotná tisková hlava. Jinou možností je, že tisková podložka obstarává pouze kruhový pohyb, a tisková hlava se pak pohybuje v osách Y a Z. Tomu tak je i v případě polárních 3D tiskáren uvedených na obr. 8. [15, 16]



Obr. 8: Polar 3D tiskárny R-360. [15]

Nespornou výhodou tohoto typu 3D tiskáren je nutné použití pouze dvou krokových motorů, což je velmi úsporné řešení konstrukce, které navíc slibuje i vyšší energetickou účinnost. Je zde také možné tisknout i větší předměty. Na druhou stranu se jedná o málo rozšířenou a relativně mladou konstrukci 3D tiskáren, jež má ve srovnání s kartézským typem 3D tiskáren složitější řízení. [15, 16]

2.4 Scara 3D tiskárny

V poslední době se pozvolně začínají v 3D tisku uplatňovat 3D tiskárny na principu robotických ramen známých například z montážních linek. Typ těchto 3D tiskáren dostal název scara. Principiálně je celá tisková hlava umístěna na konci robotického ramene, které se pak dokáže pohybovat ve všech osách. Tím dokáže s velkou přesností vytisknout i velmi složité předměty. Tento typ je však stejně jako 3D tiskárny polar relativně nový a málo rozšířený. Příklad scara 3D tiskárny Morgan Pro 2 je uveden na obr. 9. [15, 16]



Obr. 9: Scara 3D tiskárna Morgan Pro 2. [15]

3 Materiály pro FDM 3D tisk

Materiálů pro FDM 3D tiskárny existuje celá řada s rozdílnými vlastnostmi, cenou a vhodností použití, zpravidla jsou to však různé typy termoplastů. Ty jsou pro účel 3D tisku dodávány ve formě tiskové struny tzv. filamentu, viz obr 10, o průměru 1,75 mm nebo 2,85 - 3 mm. V rámci FDM 3D tisku je možné se setkat s termoplastickými polymery například PET (Polyethylentereftalát), PC (Polykarbonát) či jedním z nejpoužívanějších materiálů co se FDM 3D tisku týče ABS (Akrylonitril butadien styren). Dále velmi často s plastovým materiálem PLA (Kyselina Polymléčná), který je jako jediný plast používaný pro 3D tisk vyroben z rostlinného škrobu. Při návrhu 3D tiskárny jsou třeba zohlednit tiskové vlastnosti materiálů, jež se budou při 3D tisku používat. Podle nich se totiž odvíjí například maximální teplota tiskové podložky či teplota extrudéru. V následujících podkapitolách budou blíže probrány a porovnány vlastnosti dvou již zmíněných nejpoužívanějších plastů ABS a PLA, jejichž použití se předpokládá u navržené delta 3D tiskárny. Mimo jiné, obecně by každá 3D tiskárna měla jejich tisk zvládat. [1, 20, 21, 22]



Obr. 10: Příklad navinutých tiskových strun (filamentu). [23]

3.1 ABS (Akrylonitril butadien styren)

Jedná se o amorfnní termoplastický polymer na ropné bázi. Mezi jeho klíčové vlastnosti patří odolnost proti mechanickému poškození, na druhou stranu je však poměrně lehce opracovatelný. Dále je pak velkou výhodou mechanická pevnost s poměrně dlouhou životností, houževnatost a odolnost proti nízkým i vysokým teplotám. Je také málo nasákvavý a v pevném stavu zdravotně nezávadný. Dobrou vlastností je i odolnost proti působení kyselin, hydroxidů, uhlovodíků nebo olejů a tuků. Jedná se o levný materiál, navíc vyráběný v široké škále různých barev, tudíž je výhodné jej použít k výrobě prototypů. Je možné jej opatřit i nátěrem. Při jeho tisku je nutné použití vyhřívané tiskové podložky s doporučenou teplotou 95 - 130 °C, z důvodu zabránění deformacím tisknutého předmětu. Teplota tiskové hlavy (trysky) pak většinou bývá v rozmezí

220 - 275 °C. Nevýhodou je smršťování vytisknutého předmětu při jeho postupném chlazení a uvolňování škodlivých výparů při tisku. [1, 20, 21, 22]

Výrobky z ABS však není vhodné používat pro medicínské účely nebo v potravinářství. Z ABS je možné vyrábět funkční vzorky, nástroje či běžné věci pro každodenní použití. Nevýhodou však je, že tyto výrobky nesmí být vystaveny delší dobu povětrnostním vlivům, jinak dochází k jejich degradaci. [1, 20, 21, 22]

3.2 PLA (Kyselina Polymléčná)

Na rozdíl od ABS jde o materiál, jež je biologicky zcela rozložitelný. PLA je vyráběno většinou ze škrobu původem z kukuřice, brambor nebo cukrové třtiny, tedy z přírodních obnovitelných zdrojů. V současnosti je jeho využívání především kvůli ekologii a nízké ceně stále více v oblibě a řadí se tak mezi vůbec nejpoužívanější plasty v FDM 3D tisku. Co se 3D tisku týče, jedná se o jeden z nejuniverzálnějších materiálů, se kterým je možné tisknout i velké plochy a předměty. [1, 20, 21, 22]

Mezi jeho výhody patří značná tvrdost, pružnost a mechanická odolnost, minimálně srovnatelná s jinými plasty založených na ropné bázi. Velkou výhodou je jen nepatrné nebo zcela žádné kroucení tištěného předmětu. To samé platí i o tendenci smršťování právě vytištěného předmětu. Na druhou stranu je jeho použití omezené ve vlhkých prostorách, protože má tendenci pohlcovat vzdušnou vlhkost. Stejně tak musí být před 3D tiskem skladován v suchých prostorách jinak by při tisku vznikaly na povrchu tištěného předmětu bublinky způsobené vypařováním vzdušné vlhkosti z roztavené tiskové struny (filamentu) PLA. [1, 20, 21, 22]

Velkou výhodou oproti ABS je, že není potřeba použít tiskovou podložku, která by byla vyhřívaná, což značně zvyšuje energetickou účinnost tisku. Doporučuje se však teplota tiskové podložky v rozmezí 20 - 60 °C. Teplota tiskové hlavy (extrudéry) pak většinou bývá v rozmezí 180 - 220 °C. Nehrozí zde také uvolňování zdraví škodlivých výparů, protože jak již bylo řečeno, PLA se skládá pouze z přírodních materiálů. I přesto, že tisk probíhá při nižších teplotách bez použití vyhřívané tiskové podložky, je vytištěný předmět pevný a bez tendenci odlupování jednotlivých vrstev vytištěného materiálu. Při použití PLA může celý proces tisku probíhat rychleji než v případě jiných plastů. Kvůli nízké teplotě tavení je však následné opracování vytištěného předmětu kupříkladu pomocí broušení nebo obrábění problematictější než v případě ABS. Stejně tak je problematické vystavení předmětu vyrobeného z PLA vysokým teplotám a slunečnímu záření, kdy dochází poměrně brzy k velkým deformacím. [1, 20, 21, 22]

Do PLA při jeho výrobě lze přidávat další příměsi, jakož jsou částičky dřeva nebo kovů, a tím lze přiblížit jeho vlastnosti k přidané příměsi. Z materiálů PLA je vyrobena celá řada produktů, které mohou být náročné na rozměrovou stálost při procesu tisku a přesnost. Tím, že je PLA zdravotně nezávadné, je možné z něj vyrábět výrobky i pro potravinářský průmysl. Nutné je však vždy zohlednit

již zmiňovanou nízkou maximální teplotu, při níž takový výrobek může být použit a taktéž postupnou degradaci v závislosti na prostředí, ve kterém je výrobek použit. [1, 20, 21, 22]

Dalším hojně využívaným plastovým materiálem v 3D tisku je PETG (Polyethylentereftalát modifikovaný glykolem), který je svými vlastnostmi kompromisem mezi PLA a ABS a jsou z něj vyráběny nejrůznější konstrukční prvky, či například mimo 3D tisk i PET láhve nebo oděvy. Pro výrobu otěru odolných součástí se využívá Nylon, dalšími hojně využívanými plasty v 3D tisku pak jsou Polykarbonát (PC) a polypropylen (PP). [21] Porovnání vlastností zmíněných plastových materiálů používaných v FDM 3D tisku je uvedeno v tab. 2. Některé jejich parametry uvedené v tab. 2 jsou určeny pouze pro vzájemné porovnání plastových materiálů.

Tab. 2: Porovnání vlastností základních materiálu pro FDM 3D tisk. [20]

	ABS	PLA	PETG
Max. pevnost v tahu	40 MPa	65 MPa	53 MPa
Tuhost	5/10	7,5/10	5/10
Odolnost	8/10	7,5/10	8/10
Max. provozní teplota	98 °C	52 °C	73 °C
Tepelná roztažnost	90 $\mu\text{m}/\text{m}\cdot^{\circ}\text{C}$	68 $\mu\text{m}/\text{m}\cdot^{\circ}\text{C}$	60 $\mu\text{m}/\text{m}\cdot^{\circ}\text{C}$
Hustota	1,04 g/cm ³	1,24 g/cm ³	1,23 g/cm ³
Tiskové vlastnosti	8/10	9/10	9/10
Teplota extrudéru	220 - 275 °C	180 - 220 °C	230 - 250 °C
Vyhřívání tisková podložka	Ano	Ne	Ano
Teplota tiskové podložky	95 - 130 °C	20 - 60 °C	75 - 90 °C
Další vlastnosti	Nárazu vzdorný Teplotně odolný	Ekologický	Chemicky a vodě odolný Odolný proti únavě materiálu
	Nylon	PC	PP
Max. pevnost v tahu	40 - 85 MPa	72 MPa	32 MPa
Tuhost	5/10	6/10	4/10
Odolnost	10/10	10/10	9/10
Max. provozní teplota	80-95 °C	121 °C	100 °C
Tepelná roztažnost	95 $\mu\text{m}/\text{m}\cdot^{\circ}\text{C}$	69 $\mu\text{m}/\text{m}\cdot^{\circ}\text{C}$	150 $\mu\text{m}/\text{m}\cdot^{\circ}\text{C}$
Hustota	1,06 - 1,14 g/cm ³	1,2 g/cm ³	0,9 g/cm ³
Tiskové vlastnosti	8/10	6/10	4/10
Teplota extrudéru	220 - 270 °C	260 - 310 °C	220 - 250 °C
Vyhřívání tisková podložka	Ano	Ano	Ano
Teplota tiskové podložky	70 - 90 °C	80 - 120 °C	85 - 100 °C
Další vlastnosti	Flexibilní Nárazu vzdorný Teplotně odolný Odolný vůči únavě materiálu	Nárazu vzdorný Teplotně odolný Odolný vůči únavě materiálu	Flexibilní Měkký Teplotně a vodě odolný Odolný vůči únavě materiálu

4 Teplo a principy jeho přenosu

Následující podkapitoly jsou jakousi odbočkou od technologie 3D tisku, avšak v souvislosti s konstrukcí delta 3D tiskárny, která bude uvedena v dalších kapitolách, je nutné se problematice přenosu tepla věnovat. Zvláště z důvodu použití topných elementů, jakož je tryska pro extruzi roztaveného plastu a vyhřívaná podložka, jež jsou nedílnou součástí nejenom zkonstruované delta 3D tiskárny, ale obecně všech FDM 3D tiskáren. V případě této diplomové práce je jedním z požadavků navrhnout takovou vyhřívanou podložku, aby bylo dosaženo rovnoměrného prohřátí tištěného předmětu na požadovanou teplotu. Současně však nesmí docházet k poškození samotné konstrukce 3D tiskárny vlivem tepla. Použití vyhřívané tiskové podložky řeší dilataci roztažnosti plastů, čímž je eliminována deformace výtisku způsobená samotným tiskem. Otázka tepla je rovněž důležitá i u navržené tiskové hlavy s tím rozdílem, že zde bude dodávané teplo sloužit k tavení plastového materiálu (PLA, ABS), z něž bude tištěný předmět delta 3D tiskárnou vyráběn. Následující odstavce a kapitoly čerpají z vlastní předešlé bakalářské práce, jež se rovněž zabývá podobnou problematikou ohledně přenosu tepla.

Řada nejenom technických oborů se musí potýkat s poměrně rozsáhlou problematikou tepla, respektive teploty. Velmi často se řeší dosažení určité požadované teploty předmětu, rozdílné od okolního prostředí. Teplo Q představuje energii přenesenou mezi dvěma předměty s rozdílnou teplotou, kdy při tomto ději dojde ke změně jejich vnitřní energie. Velikost přijatého nebo odebraného tepla Q určitého předmětu lze vypočítat rovnicí 1. [24, 25]

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta T \text{ [J]} \quad (1)$$

Veličiny v rovnici 1 jsou následující, kdy c [$\text{J} \cdot \text{kg} \cdot \text{K}^{-1}$] je měrná tepelná kapacita materiálu tělesa, m [kg] je jeho hmotnost a ΔT [K] je rozdíl mezi počáteční a konečnou teplotou předmětu.

Teplota je stavovou veličinou patřící do SI soustavy. Může být udávána různými stupnicemi, nejčastěji na Kelvinově [K], Celsiově [$^{\circ}\text{C}$] a Fahrenheitově [$^{\circ}\text{F}$]. Dohromady se vyskytují tři mechanismy přenosu tepla, tedy přenos tepla kondukcí (vedením), konvekcí (prouděním) a radiací (zářením). [24, 25]

a) Přenos tepla kondukcí (vedením)

Prvním mechanismem přenosu tepla je kondukce, která může probíhat v pevných látkách a v kapalinách. Při zahřívání tělesa roste v daném místě množství a velikost kmitů částic tvořících těleso. Díky tomu do sebe sousední částice narážejí, a tak dochází k přenosu těchto kmitů na další částice, a tedy k přenosu energie, respektive tepla Q . Fyzicky se však díky tomu uvnitř tělesa částice nepohybují, ale pouze kmitají kolem svých rovnovážných poloh. [24, 25]

Přenos tepla kondukcí Q_{cond} se řídí Fourierovým zákonem, viz rovnice 2, kde $K [W \cdot m^{-1}]$ je tepelná vodivost, $A [m^2]$ je oblast přenosu tepla a (dT/dx) je teplotní gradient na oblasti přenosu tepla. [26]

$$Q_{cond} = -K \cdot A \cdot \left(\frac{dT}{dx}\right) [J] \quad (2)$$

b) Přenos tepla konvekcí (prouděním)

Druhou možností přenosu tepla je pomocí konvekce (proudění). Přenos tepla zde může probíhat mezi pevnou a plynnou látkou anebo mezi pevnou a kapalnou látkou. Celkem se zde uplatňují dva způsoby přenosu tepla. Jednak je teplo přenášeno pomocí nahodilého pohybu molekul uvnitř pevné látky a jejich pronikáním v bezprostřední blízkosti pevné látky do látky kapalně nebo plynné, což je princip přenosu tepla kondukcí. Dále je přenos tepla zapříčiněn samotným prouděním plynné nebo kapalně látky vlivem jejího ohřívání a snižováním hustoty. Na rozdíl od předešlého způsobu přenosu způsobu tepla se zde částice látky pohybují. Konvekce, respektive proudění se dělí na přirozené a nucené a dále taktéž jej lze rozdělit na laminární a turbulentní, což stanovuje Reynoldsovo číslo. [24, 25]

Přenos tepla pomocí konvekce Q_{conv} se řídí Newtonovým zákonem, viz rovnice 3, kde je proměnná $\alpha [W \cdot m^{-2} \cdot K]$ součinitel přestupu tepla, $A [m^2]$ je oblast přenosu tepla, $T_p [^{\circ}C]$ teplota pevné látky a $T_k [^{\circ}C]$ teplota kapaliny nebo plynu. Alternativní možnosti popisu přenosu tepla pomocí konvekce jsou Navier-Stokesovy rovnice. [25, 26]

$$Q_{conv} = \alpha \cdot A \cdot (T_p - T_k) [J] \quad (3)$$

c) Přenos tepla radiací (zářením)

Při mechanismu přenosu tepla zářením dochází k přenosu tepla elektromagnetickým vlněním, jinak řečeno tepelným zářením. To může probíhat v hmotném i nehmotném prostředí. Pokud roste teplota tělesa a tím i jeho vnitřní energie, začíná u něj docházet k vyzařování elektromagnetických vln do přilehlého okolí. Ty může pohltit jiné těleso, čímž se zvýší jeho vnitřní energie a teplota. Elektromagnetické vlny nemusí být jen pohlceny, ale mohou taktéž projít tělesem nebo můžou být odraženy. Vliv na to má emisivita tělesa $\varepsilon [-]$ nabývající hodnot od 0 do 1 a zohledňující barvu a strukturu povrchu tělesa. Výkon $P [W]$ přenesený mezi tělesy zářením udává Stefanův-Boltzmannův zákon, viz rovnice 4, kde $S [m^2]$ je povrch a $T [K]$ teplota tělesa a $\sigma [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}]$ je Stefanova-Boltzmanova konstanta. [24, 25]

$$P = \sigma \varepsilon S T^4 [W] \quad (4)$$

5 Používaná elektronika u 3D tiskáren

Při každé konstrukci 3D tiskárny je kromě typu 3D tiskárny důležité vybrat potřebnou elektroniku, jenž zajišťuje řízení 3D tiskárny a tím i procesu 3D tisku, a současně je i úzce spjatá s použitelným softwarem a firmwarem. V dnešní době existuje nepřeberné množství všemožné elektroniky 3D tiskáren, ať už jde například o řídicí desku, krokové motory, či spínače nebo snímače. Proto si může každý konstruktér vybrat elektroniku přímo na míru své 3D tiskárně. Samozřejmě jedním z nejdůležitějších atributů při výběru vhodné elektroniky je její cena. Na trhu se nachází jednak celá řada elektronických komponent od renomovaných výrobců, u nichž je zaručena správná funkčnost a jsou zde minimalizovány nebo téměř vyloučeny hardwarové chyby vzniklé nesprávným návrhem nebo chybou výroby. Dále je k nim dostupný většinou zcela funkční software a firmware, což jejich použití značně ulehčuje. Neméně důležitá je taktéž jejich dobře dostupná servisní podpora. To vše je však vykoupeno vyšší pořizovací cenou, nezřídka kdy rovnou několikanásobku ceny většinou levnějších variant elektroniky dostupných skrze různé internetové obchody, jež tuto elektroniku nabízejí. Zde však již výše uvedené výhody, které nabízí elektronika renomovaných výrobců, nezřídka kdy odpadají.

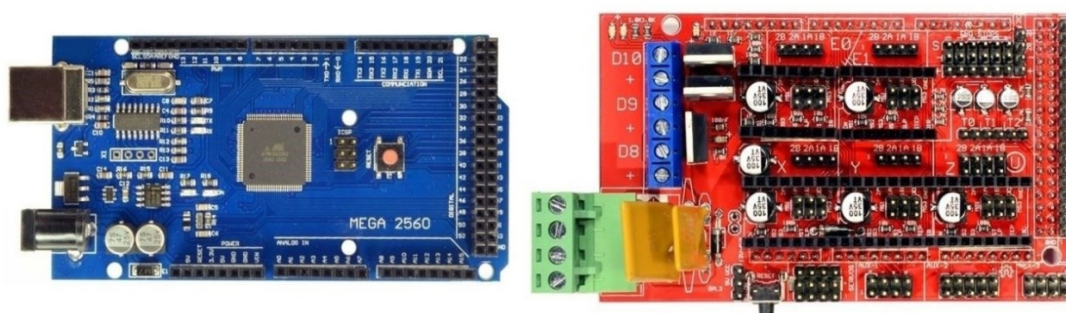
Proto je třeba při každém výběru elektroniky 3D tiskárny brát ohled nejen na její cenu, ale taktéž na funkčnost a další užité vlastnosti. To bylo pečlivě zohledněno i při výběru elektroniky zkonstruované delta 3D tiskárny v této diplomové práci. V následující odstavcích budou popsány některé komponenty elektroniky používané u 3D tiskáren včetně uvedení jejich nejběžnější variant používaných u volně šiřitelných konstrukcí (RepRap) 3D tiskáren.

Jednou z nejzásadnějších komponent elektroniky každé 3D tiskárny je řídicí deska. Ta zajišťuje ovládání a řízení celé 3D tiskárny včetně všech jejích periférií a dále taktéž komunikaci 3D tiskárny s počítačem nebo v některých případech s mobilním telefonem. Každá řídicí deska obsahuje mikroprocesor, konektory pro vstupy, výstupy, napájení a připojení dalších přídatných komponent. Případně i na sobě integruje ovladače krokových motorů, tranzistory pro regulaci výkonu dodávaného do tiskové podložky a tiskové hlavy nebo například Wi-Fi modul či jiné součásti vylepšující funkcionalitu řídicí desky a tím i celé 3D tiskárny.

V současnosti je možné se setkat s dvojím řešením řídicích desek, v právním případě se jedná o soubor dvou navzájem propojených desek většinou pomocí pinových lišt. Tedy hlavní univerzální desky, na níž je mikroprocesor, jeho napájecí zdroj a další součástky nezbytné pro její funkčnost, a jsou zde také na příslušné konektory vyvedeny vstupy a výstupy mikroprocesoru. Druhou deskou je pak tzv. přídatná deska na níž je výkonová část s hlavním napájecím zdrojem, již zmíněné tranzistory pro regulaci výkonu dodávaného do vyhřívané podložky a tiskové hlavy, vývody pro připojení ovladačů krokových motorů a další specifické konektory a příslušenství.

Druhé, výrobci nabízené řešení je jedna kompaktní deska, která spojuje funkci hlavní univerzální desky a přídatné desky.

V současné době je u volně šiřitelných návrhů 3D tiskáren hojně využívána vývojová deska Arduino Mega 2560 založená na 8bitovém mikroprocesoru ATMEGA2560 [27], případně obdobné řídicí desky postavené na stejnojmenném mikroprocesoru. Absolutně největší výhodou je velká rozšířenost, široká dostupnost přídatných desek a velké množství dostupných volně šiřitelných softwarů a firmwarů pro 3D tiskárny. Naopak poměrně limitující je nižší výpočetní výkon, což může negativně ovlivňovat funkci především delta 3D tiskáren či jiných, na výpočetní výkon náročnějších, typů 3D tiskáren. Vývojová deska Arduino Mega 2560 i s příkladem rozšiřující desky, v tomto případě desky RAMPS [28], je uvedena na obr. 11.

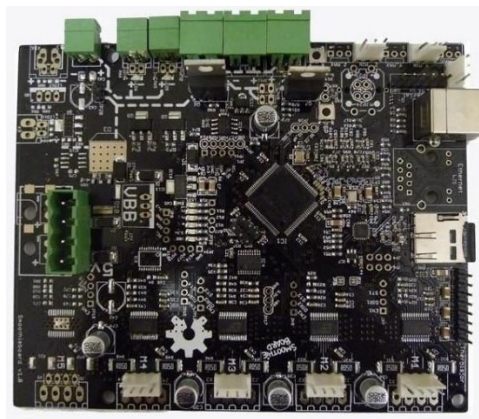


Obr. 11: Vývojová deska Arduino Mega 2560 a rozšiřující deska RAMPS. [28]

Co se pro přehled základních parametrů výše zmíněného mikroprocesoru ATMEGA2560 týče, ten pracuje na maximální taktovací frekvenci 16 MHz, disponuje FLASH pamětí o velikosti 256 kB, z níž je 8 kB použito pro zavaděč, pamětí SRAM o velikosti 8 kB a pamětí EEPROM o velikosti 4 kB. Jim osazená deska Arduino Mega 2560 má 54 digitálních vstupně výstupních pinů, z nichž je možné použít 14 pinů jako PWM výstupy. Kromě těchto pinů má ještě dalších 16 analogových vstupních pinů a dále také 4 UART porty. [27] Vývojová deska Arduino Mega 2560 bývá při použití u 3D tiskáren spojována s různými rozšiřujícími deskami, velmi často s oblíbenou rozšiřující deskou RAMPS, viz obr. 11 vpravo. [27]

Aktuálním pomalu rozmáhajícím se trendem u 3D tiskáren je použití řídicích desek s 32bitovými mikroprocesory spolu s volně šiřitelným firmwarem a softwarem. Ve velké míře jsou tyto desky založeny na mikroprocesoru ARM Cortex-M3. [29] To sebou přináší velké výhody, především v mnohem vyšším výpočetním výkonu (mikroprocesor pracuje na vyšší taktovací frekvenci) a ve velikosti paměti, což je obzvlášť výhodné při jejich použití u delta 3D tiskáren. Dalšími výhodami může být nižší spotřeba elektrické energie nebo širší množství různých periférií dostupných přímo na desce. [29] Určitou nevýhodou je nezaručená kompatibilita s přídatnými deskami používanými k 8bitovým řídicím deskám z důvodu rozdílného napájecího napětí a také její aktuálně malá rozšířenost. Tou však nejzásadnější nevýhodou je špatná uživatelská podpora, a špatná dostupnost a malé množství volně šiřitelných firmwarů a softwarů určených pro tyto řídicí desky. Mezi zástupce používaných 32bitových

řídících desek patří například desky Smoothieboard [30] či deska MKS Robin Nano [31]. Poslední jmenovaná řídící deska byla použita i u delta 3D tiskárny zkonstruované v této diplomové práci. Srovnání jejích parametrů, výhod a nevýhod s nejběžněji používaným provedení řídící desky, tedy deskou Arduino Mega 2560 v kombinaci s rozšiřující deskou RAMPS je uvedeno v kapitole 7. Příklad 32bitové řídící desky Smoothieboard [30] je uveden na obr. 12.



Obr. 12: Řídící deska Smoothieboard. [30]

Nedílnou součástí většiny řídících desek, velmi usnadňující ovládání 3D tiskárny, je LCD displej. Jejich nabídka je velmi rozsáhlá a je možné se setkat od jednoduchých jednobarevných LCD displejů až s plně grafickými dotykovými displeji.






Neméně důležitou součástí elektroniky 3D tiskáren jsou ovladače krokových motorů. Jak již z jejich názvu vyplývá, slouží k ovládání pohybu krokových motorů a značně tak ovlivňují jejich chování a výsledné vlastnosti. Bez jejich použití by řídící deska nebyla schopná dodat potřebný proud pro pohyb motoru. Další funkcí ovladačů je zajišťovat částečné kroky (tzv. mikro kroky), což pomáhá vyhlazovat pohyb krokových motorů a snižují se tím jejich vibrace. Taktéž samotný pohyb krokového motoru musí být, pokud možno co nejpřesnější a nejrychlejší. Ovladače krokových motorů mohou být součástí řídící desky, což sebou nese tu nevýhodu, že nejdou nijak vyměnit či nahradit. V mnoha případech se však používají externí ovladače, které jsou v podobě malé desky, jenž je připojena na pinové lišty řídící desky. [32, 33]

Nejdůležitější součástí ovladačů krokových motorů je integrovaný obvod, který celou regulaci zajišťuje. Ten v sobě ukrývá obvod, který na základně vstupních signálů generuje PWM (Pulse Width Modulation) signál, pomocí něž jsou řízeny výkonové tranzistory. Ty jsou taktéž součástí integrovaného obvodu a slouží zde ke spínání napětí na výstupech ovladače, k němuž je připojen krokový motor. Řada těchto integrovaných obvodů určených pro ovladače krokových motorů umožňuje pohyb po mikro krocích. Řídící desce pak ke komunikaci s ovladačem krokového motoru postačují většinou tři signály, signál STEP pro pohyb motoru po jednom kroku, signál DIR pro výběr směru pohybu a signál, respektive pin desky, na zemním potenciálu GND. Kromě integrovaného obvodu se pak na destičce ovladače krokových motorů nacházejí

ještě blokovací kondenzátory, rezistory, jimiž jsou nastaveny různé funkce integrovaného obvodu, a další součástky. [32]

Mezi nejdůležitější parametry ovladačů krokových motorů patří rozsah použitelného napájecího napětí, velikost trvalého a špičkového proudu odebíraného krokovým motorem a počet mikro kroků. Avšak úplně tím nejpodstatnějším parametrem je druh použitého integrovaného obvodu, který většinu ostatních parametrů sám předurčuje. Příklady používaných ovladačů krokových motorů u 3D tiskáren jsou uvedeny včetně jejich parametrů v tab. 3. [33]

Tab. 3: Příklad používaných ovladačů krokových motorů u 3D tiskáren. [33, 34]

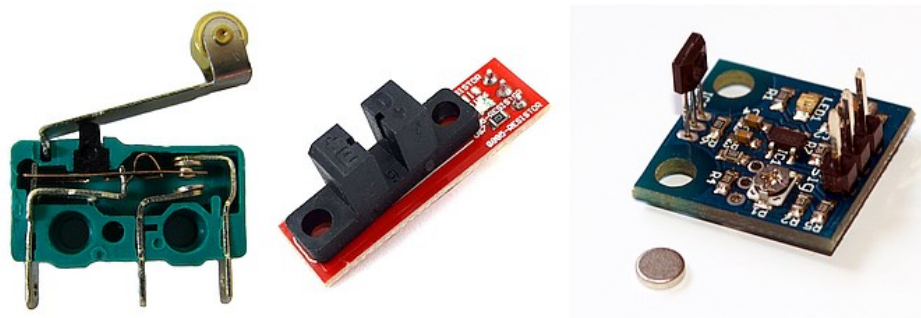
					
Integrovaný obvod	A4988	DRV8825	DRV8880	TB67S279FTG	TMC2130
Min. pracovní napětí	8 V	8,2 V	6,5 V	10 V	5,5 V
Max. pracovní napětí	35 V	45 V	45 V	47 V	46 V
Max. stálý proud (jednou fází)	1 A	1,5 A	1 A	1,1 A	1,2 A
Max. špičkový proud (jednou fází)	2 A	2,2 A	1,6 A	2 A	2,5 A
Mikro krokování (až)	1/16	1/32	1/16	1/32	1/256

V současné době se lze hojně setkat s ovladači krokových motorů postavených na bázi integrovaných obvodů například od firmy Allegro, kdy jsou ovladače značeny písmenem A, například A4988, od firmy Texas Instruments jejíž ovladače jsou označeny DRV, například DRV8825, anebo od firem STMicroelectronics, ovladače označeny (L), Toshiba ovladače označeny (TB) anebo Trinamic ovladače označeny (TMC), například TMC2130. Na posledním zmíněném ovladači krokových motorů TMC2130, viz tab. 3, lze taktéž pozorovat současný trend zvyšování počtu mikro kroků, tzv. tišší ovladače krokových motorů a zvětšování maximálního proudového zatížení. [32, 34]

Další nezbytnou součástí elektroniky 3D tiskáren jsou koncové spínače, které mohou být použity na jednotlivých osách pohybu 3D tiskárny pro vymezení maximálního rozsahu pohybu tak, aby nedošlo k poškození některých součástí 3D tiskárny. Dále také mohou sloužit ke kalibraci 3D tiskárny. [35, 36]

Jedním z nejběžnějších řešení je použití obyčejných mechanických kontaktních spínačů. Jejich výhodou je jednoduchost, nízká cena, prostorová nenáročnost a taktéž je možné spínač bez použití další přídavné elektroniky přímo připojit k řídicí desce. Nevýhodou je naopak limitace v podobě počtu cyklů sepnutí a rozepnutí spínače, protože dochází k opotřebovávání mechanických kontaktů. Taktéž opakovatelnost sepnutí a rozepnutí je závislá na konkrétním typu spínače, a ne u všech je dostatečná. Poslední nevýhodou jsou šum a zákmity vznikající během spínání a rozepínání spínače.

Na obr. 13 jsou uvedeny nejpoužívanější spínače u 3D tiskáren, kde vlevo je příklad mechanického, uprostřed optického a vpravo indukčního spínače. [35, 36]



Obr. 13: Koncové spínače používané u 3D tiskáren. [37]

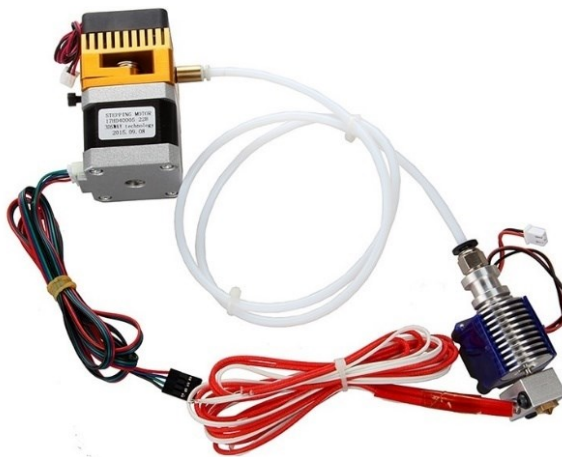
Poměrně rozšířené jsou u 3D tiskáren i již zmíněné spínače optické. Ty pracují na principu LED diody (vysílače) a fototranzistoru (přijímače), kdy při přerušení procházejícího světelného toku mezi nimi, dojde k sepnutí tranzistoru a tím i celého spínače. Výhodou je, že zde nedochází k opotřebení spínače. Na druhou stranu jejich rozměry jsou z důvodu nutnosti použití dalších potřebných součástek větší, a i jejich cena je vyšší ve srovnání s mechanickými spínači. Správná funkce optických snímačů je však závislá i na okolních světelných podmínkách. Dále je taktéž možné se u 3D tiskáren setkat s indukčními a magnetickými snímači, které používají tranzistory nebo Hallovu sondu k detekci mezní hodnoty magnetického pole. Jsou vysoce přesné a odolné proti okolním podmínkám s výjimkou velkého magnetického pole. [36, 38]

Zcela nezbytnou součástí každé FDM 3D tiskárny je její tisková hlava. Ta má hned několik funkcí. Jednak přivedení a pomocí svojí trysky následné roztavení tiskové struny (filamentu). Dále pak uložení tohoto roztaveného materiálu do požadovaných míst na tiskovou podložku. [39]

Tisková hlava mívá obvykle dva konce, studený a teplý, jež jsou navzájem spojeny izolátorem, který brání přenosu tepla mezi oběma konci. Úkolem studeného konce tiskové hlavy je za pomoci krokového motoru přivádět tiskovou strunu do teplého konce tiskové hlavy. Ten je jednou s nejsložitějších součástí 3D tiskárny. Uvnitř kovového těla ukrývá topné těleso, které dokáže zahřát přiváděnou plastovou strunu na požadovanou teplotu, při níž dochází k jejímu tavení. Následně je tento roztavený plast vytlačován ven z kovového těla teplého konce tiskové hlavy skrz tenkou trysku a pokládán v tenkých vrstvách na tiskovou podložku. Uvnitř teplého konce se nachází taktéž termočlánek pro monitorování aktuální teploty. Tisková hlava většinou bývá opatřena ventilátorem pro zlepšení účinnosti chlazení teplého konce. [39]

Ve své podstatě existují dva druhy tiskové hlavy. V prvním případě je to druh kompaktní tiskové hlavy, která obsahuje dohromady jak teplý, tak i studený konec včetně krokového motoru, tzv. přímá tisková hlava. Ve druhém případě se pak jedná o tiskovou hlavu s bowdenem. Rozdílem je umístění krokového motoru pro podávání

tiskové struny mimo samotnou tiskovou hlavu, nejčastěji na rám 3D tiskárny, jde tedy o tzv. extrudér. Ten je pak spojen pomocí duté trubičky (bowdenu), soužícíího pro vedení tiskové struny, s tiskovou hlavou. Výhodou tohoto typu tiskových hlav je jejich nízká hmotnost, čímž pádem se mohou rychleji pohybovat při tisku a tisk je pak mnohem rychlejší. Velmi často se používají u 3D tiskáren typu delta. Příklad tiskové hlavy s bowdenem je uveden na obr. 14. [40, 41]



Obr. 14: Příklad tiskové hlavy s bowdenem. [42]

Volba druhu tiskové hlavy (přímé nebo s bowdenem) se provádí na základě použité konstrukce 3D tiskárny. V současnosti se začíná projevovat trend použití tiskových hlav, jež umožňují tisk více materiálů současně. [41]

Další součástí elektroniky 3D tiskáren je vyhřívaná tisková podložka. Opět zde platí, že je možno vybírat z různých typů, vyrobených jak na hliníkovém substrátu, tak na substrátu FR4. Ty se dále liší samotným tvarem provedení (kruhové, čtvercové, obdélníkové, šestiúhelníkové), tvarem topného meandru, maximálním příkonem či použitelným napájecím napětím (12 V nebo 24 V). Je možné se taktéž setkat s vyhřívanými podložkami, kde topnou vrstvu tvoří nalepená kaptonová folie s topným měněným meandrem.

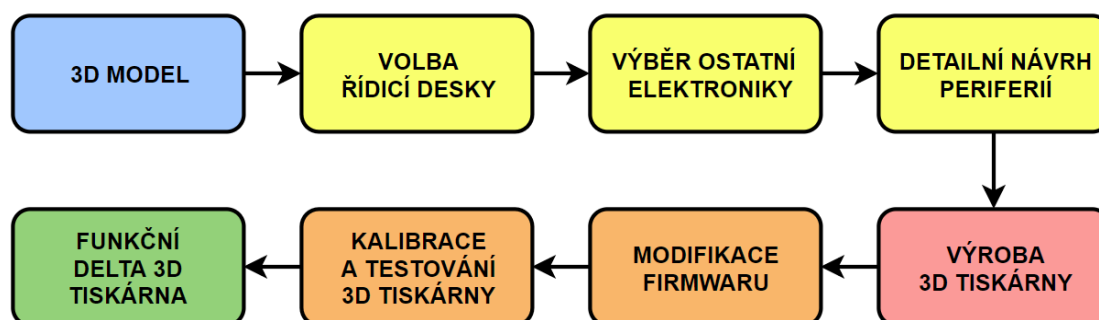
Mezi další elektroniku, nezbytnou pro chod 3D tiskárny, patří krokové motory, jež jsou většinou používány ve standardizovaném provedení NEMA17 a napájecí zdroj.

6 Cíle diplomové práce

Před samotným návrhem FDM delta 3D tiskárny a její výrobou musely být vytyčeny cíle diplomové práce, které spočívají v požadavcích, jež musí výsledná delta 3D tiskárna splňovat. Jedná se jednak o obecné požadavky vycházející přímo z principu delta 3D tiskárny a dále pak o některé specifické požadavky, jež nejsou obecně u 3D tiskáren běžné. Všechny požadavky jsou shrnuty v následujících bodech.

- Výhody plynoucí z principu delta 3D tiskárny, tj. velká rychlost tisku, přesnost a možnost tisku vyšších předmětů.
- Pevná a bytelná konstrukce s velkou tuhostí, a tedy jejím nízkým kroucením.
- Přesný způsob pohybu tiskové hlavy. Použití lineárních vedení pro pohyb ramen držících tiskovou hlavu.
- Kompaktní a lehce přenosné provedení delta 3D tiskárny, bez součástí výrazně vyčnívajících mimo konstrukci.
- Musí být použita 32bitová řídicí deska pro zajištění potřebného výpočetního výkonu a tím zvýšení rychlosti tisku. Nejlépe s barevným grafickým displejem.
- Snímatelná magnetická hlava pro její lepší údržbu a možnost rychlého sejmutí. Použitá varianta tiskové hlavy s bowdenem.
- Volitelná vyhřívaná podložka pro dobrou přilnavost tištěného předmětu k podložce, možnost tisku více druhů plastových materiálů a zamezení rozdílné tepelné dilataci vytištěného materiálu.
- Extrudér se senzorem přítomnosti tiskové struny (filamentu).
- Z-sonda pro kalibraci delta 3D tiskárny tvořená indukčním spínačem.

Postup v praktické části diplomové práce byl proveden podle blokového schématu uvedeného na obr. 15. Nejprve byl vytvořen 3D model delta 3D tiskárny, přičemž byly navrženy tištěné plastové součásti a řada dalších vyráběných součástí. Taktéž bylo provedeno sesouhlasení jednotlivých dílů tak, aby byla delta 3D tiskárna vyrobitelná bez dalších nutných pozdějších úprav dílů. Následovala volba řídicí desky a následně i výběr ostatní kompatibilní elektroniky. Před samotnou výrobou delta 3D tiskárny musel být proveden ještě detailní návrh některých periférií, jako je například tisková hlava nebo vyhřívaná podložka. Posledními kroky byla modifikace použitého firmwaru a kalibrace a testování vyrobené delta 3D tiskárny.

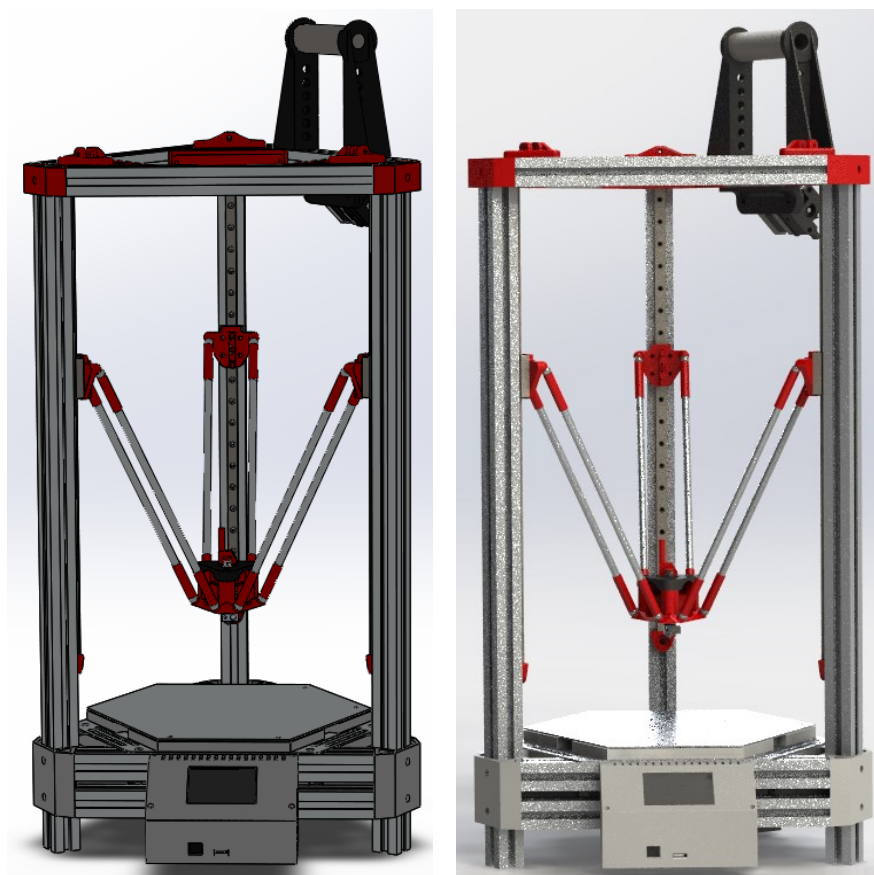


Obr. 15: Schéma postupu návrhu a výroby delta 3D tiskárny.

7 Praktická část diplomové práce

Delta 3D tiskárny, jak již bylo zmíněno v předchozích kapitolách, nejsou oproti nejběžnějším kartézským 3D tiskárnám i přes výhody plynoucí ze své konstrukce a principu funkce příliš rozšířené. Přesto se najde celá řada jejich všemožných konstrukcí a návrhů, a to ať už v komerční sféře tak i ve sféře nekomerční. V nekomerční sféře je to nespočet volně šiřitelných návrhů delta 3D tiskáren nacházejících se především na RepRap fóru anebo v obdobných komunitách. Určitou výhodou je i množství jejich modifikací a možných vylepšení, paleta použitelných softwarů, firmwarů a elektroniky. Na druhou stranu je však vždy potřeba zohlednit finanční hledisko a pracnost výroby nebo také náročnost konstrukce. V každém případě je téměř pravidlem, že dochází ať už k plánovaným či neplánovaným modifikacím a úpravám, které jsou nutné u těchto volně šiřitelných konstrukcí učinit pro zdárné dokončení a zprovoznění delta 3D tiskárny. Všechny tyto aspekty byly proto při návrhu konstrukce delta 3D tiskárny v této diplomové práci pečlivě zváženy a jako nejvhodnější se ukázala inspirace ve volně šiřitelných konstrukcích delta 3D tiskáren typu Kossel a Rostock dostupných na RepRap [15] fóru.

Úplně prvním krokem návrhu FDM delta 3D tiskárny bylo navržení vyráběných komponent a vytvoření 3D modelu delta 3D tiskárny, viz obr. 16 vlevo. Pro tento účel byl použit CAD systém SolidWorks.



Obr. 16: Vytvořený (vlevo) a vyrenderovaný (vpravo) 3D model delta 3D tiskárny.

Pro reálnější představu vzhledu delta 3D tiskárny je její vyrenderovaný model na obr 16 vpravo. Jak je z tohoto modelu delta 3D tiskárny patrné, jako základní stavební prvek byly použity hliníkové profily, jež jsou navzájem pospojovány elementy (rohy) z plastu PLA a tvoří tak rám konstrukce. Díky tomuto konstrukčnímu řešení delta 3D tiskárny bylo docíleno velké tuhosti rámu, nedochází tedy k jeho kroucení nebo ohýbání při 3D tisku, navíc práce s hliníkovými profily je méně pracná a co se týče vzhledu vznikne tím elegantní konstrukce 3D tiskárny. Tvar rámu delta 3D tiskárny pak svým typickým trojúhelníkovým tvarem připomíná písmeno velké delta (Δ) z řecké abecedy. K tomuto rámu jsou pak připevněny další komponenty a periferie potřebné pro správnou funkci delta 3D tiskárny. Předností je zde taktéž použití zmíněných lineárních vedení pro zajištění přesného pohybu ramen držících tiskovou hlavu. Díky tomu je možné s rameny držící tiskovou hlavu velmi jemně a přesně pohybovat. Pohyb úchytů ramen je tímto vymezen pouze ve vertikální ose Z.

K horní části rámu jsou upevněny napínáky řemenů, extrudér a držák špulky tiskové struny. Krabíčka s řídicí deskou a další elektronikou je pak připevněna k přední dolní části rámu. K pravé dolní části rámu je pak připevněna krabíčka síťové zásuvky. Napájecí zdroj je umístěn na držáku uvnitř dolní části rámu, ukrytý pod vyhřívanou podložkou. I přesto, že to z obr. 16 není na první pohled patrné, za povšimnutí stojí uložení krokových motorů do spodních plastových rohů 3D tiskárny. Krokové motory jsou pomocí ozubených řemenů spojeny s již zmiňovanými napínáky řemenů přišroubovanými k horním plastovým rohům a s úchyty ramen, které jsou přišroubovány k vozíkům lineárních vedení. Součástí každého úchytu ramen jsou dvě ložiskové kuličky, k nimž jsou pomocí neodymových magnetů přichycena ramena. Neodymový magnet je umístěn uvnitř ramena na obou jeho stranách, takže na stejném principu funguje i přichycení tiskové hlavy k ramenu. Není proto problém tiskovou hlavu jednoduše odejmout.

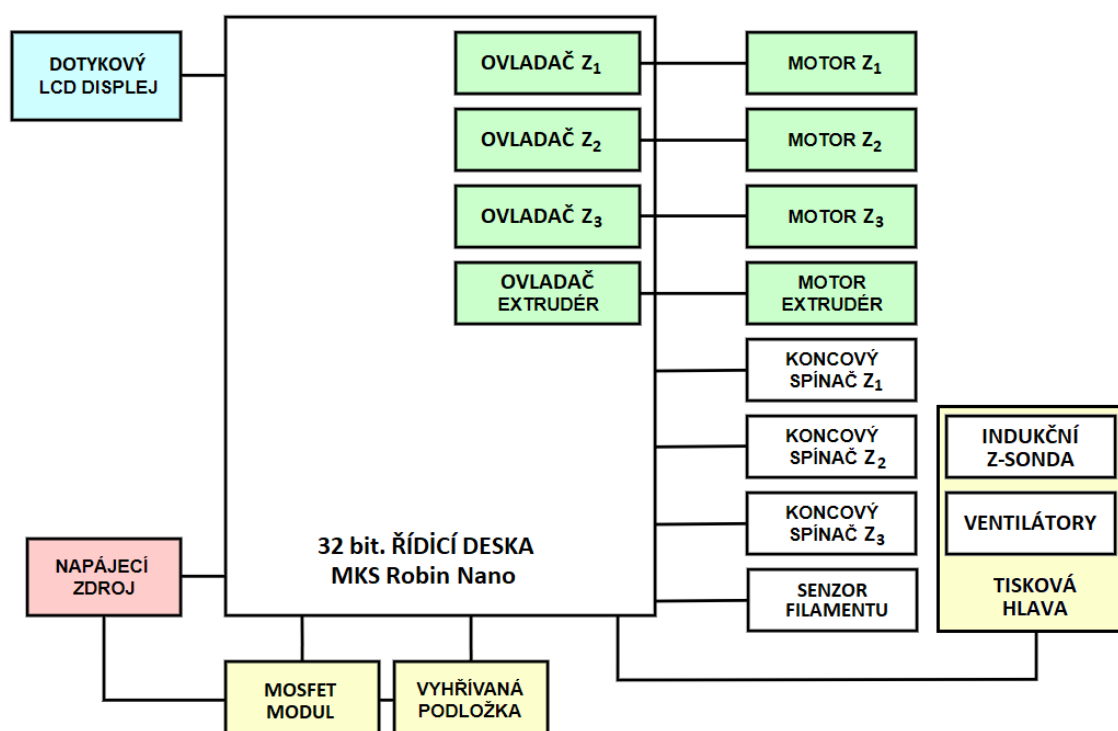
Detailní provedení všech těchto zmiňovaných nezbytných součástí delta 3D tiskárny bude uvedeno v dalších podkapitolách této diplomové práce.

Rozměry zkonstruované delta 3D tiskárny přibližně vychází z inspirativních předloh [15] a jsou tedy následující, výška delta 3D tiskárny je 745 mm a délka každé z jejích stran je 421 mm. Pomocí této delta 3D tiskárny je možné vytisknout předmět o maximální výšce až 260 mm a s maximálním průměrem do 240 mm. Ostatní vlastnosti a výhody navržené delta 3D tiskárny, jež jsou probrány v následujících podkapitolách, splňují požadavky kladené na delta 3D tiskárnu uvedené v kapitole 6.

V následujících podkapitolách je postupně probrán celý postup konstrukce delta 3D tiskárny od výběru řídicí desky a ostatní elektroniky přes detailní návrh jednotlivých periférií a výrobu delta 3D tiskárny až po modifikaci firmwaru a samotnou kalibraci a testování výsledné delta 3D tiskárny.

7.1 Použitá elektronika u delta 3D tiskárny

Po vytvoření 3D modelu delta 3D tiskárny byla provedena volba potřebné řídicí elektroniky a jejího rozložení. Zde byl zohledněn i fakt již zmíněného vyššího nároku delta 3D tiskáren na výpočetní výkon, a tedy nutnosti použití řídicí desky s vyšším výpočetním výkonem. Volba proto padla na 32bitovou řídicí desku, která tímto výkonem disponuje a současně obecně začíná být používání těchto 32bitových řídicích desek u 3D tiskáren nastupujícím trendem. Ostatní části elektroniky pak jsou již tvořeny standartně používanými, a tedy běžně dostupnými komponenty. Blokové schéma použité elektroniky u zkonstruované delta 3D tiskárny je uvedeno na obr 17.



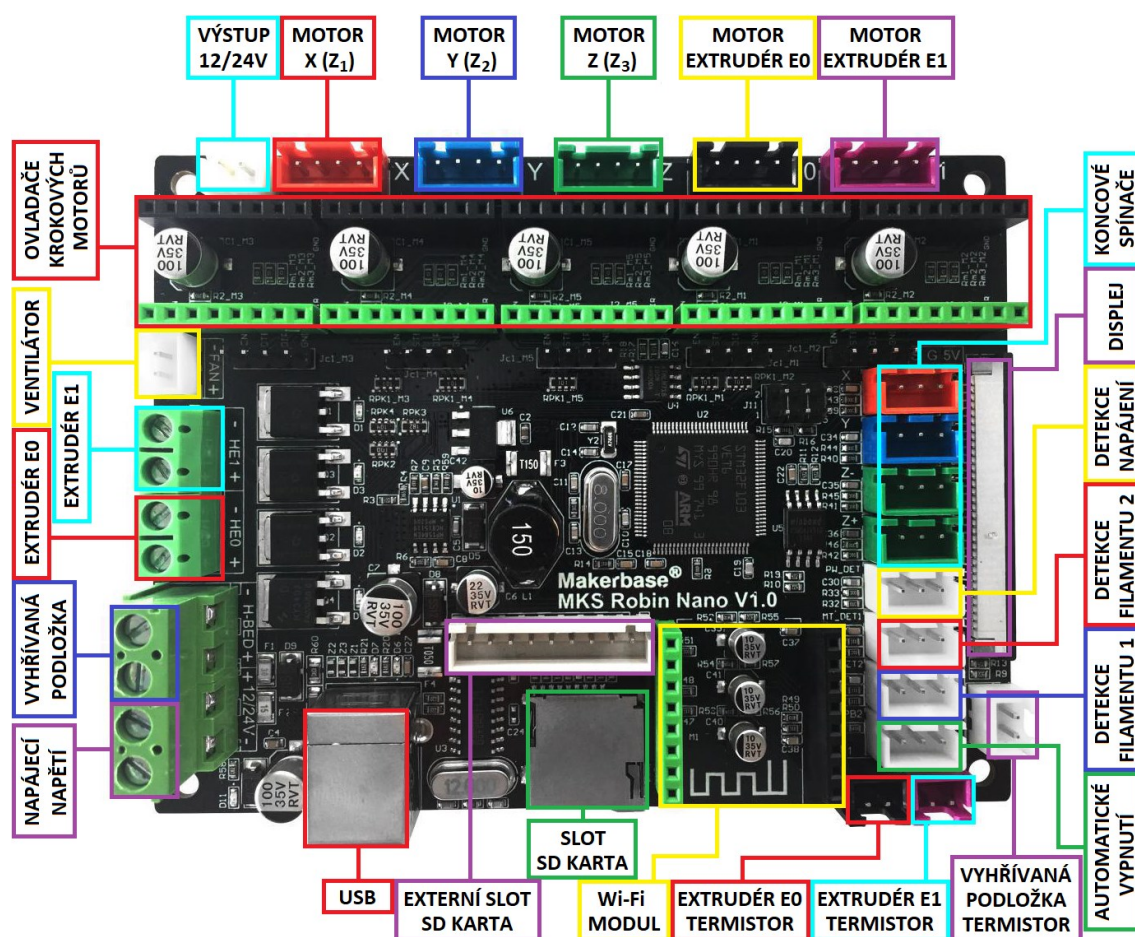
Obr. 17: Blokové schéma elektroniky zkonstruované delta 3D tiskárny.

Nejdůležitější a již zmíněnou součástí elektroniky je použitá 32bitová řídicí deska, zde byla použita typu MKS Robin Nano [31] s mikroprocesor ARM Cortex-M3 [29], jež nabízí dobrý poměr užitné hodnoty a ceny. Součástí řídicí desky je i dotykový plně grafický LCD displej, připojený k řídicí desce pomocí FFC flex kabelu, který sám o sobě zlepšuje intuitivnost ovládání delta 3D tiskárny. Neméně méně důležitou součástí elektroniky jsou ovladače krokových motorů. Použity byly celkem 4 kusy, z toho 3 pro řízení krokových motorů zajišťujících pohyb v osách Z_1 , Z_2 , Z_3 a 1 kus pro řízení krokového motoru, jež je součástí extrudéru tiskové struny. Ovladače krokových motorů nejsou přímo součástí řídicí desky, ale jsou k ní připojeny pomocí pinových lišt. Maximální rozsah pohybu v jednotlivých Z osách je vymezen pomocí koncových spínačů, ty slouží zároveň i pro určení domovské (startovní) pozice tiskové hlavy). Vymezení minimálního rozsahu pohybu, tedy minimální vzdálenosti úchyty ramene od tiskové podložky, je pak řešeno pomocí firmwaru, proto zde pro tento účel

koncové spínače použity nebyly. Nedílnou součástí elektroniky každé 3D tiskárny je její tisková hlava, kterou tvoří sestava topného tělesa, chladiče, trysky a termistoru. Zde jsou navíc ještě na tiskové hlavě umístěny ventilátory pro zajištění jejího lepšího chlazení a taktéž indukční Z-sonda pro kalibraci delta 3D tiskárny před tiskem. Stejně tak nedílnou součástí delta 3D tiskárny je její vyhřívaná podložka. Zde byl pro řízení jejího topného výkonu, použit MOSFET modul, a to z důvodu snížení proudového namáhání řídicí desky. Zbylými částmi použité elektroniky pak je senzor tiskové struny (filamentu) a 360 W napájecí zdroj s výstupním napětí 12 V ve standardizovaném provedení zajišťující napájení celé delta 3D tiskárny.

a) Řídicí deska delta 3D tiskárny.

Komponentou, která řídí chod celé delta 3D tiskárny a prostřednictvím níž může uživatel delta 3D tiskárnu ovládat, je řídicí deska. Zde byla použita již několikrát zmíněná 32bitová deska MKS Robin Nano [31]. Její podoba včetně popisů vstupních a výstupních konektorů nacházejících se na řídicí desce je vyobrazena na obr. 18.



Obr. 18: Řídicí deska MKS Robin Nano [31].

Řídicí deska MKS Robin Nano disponuje celkem 5 sloty pro externí ovladače krokových motorů. Z toho 3 jsou určeny pro ovladače krokových motorů zajišťující pohyb tiskové hlavy, v případě zkonstruované delta 3D tiskárny v osách Z₁, Z₂, Z₃, a zbylé 2 sloty jsou pak určeny pro ovladače krokových motorů dvou extrudérů.

Pro připojení samotných krokových motorů jsou na desce dostupné konektory příslušící vždy danému ovladači krokového motoru. Mimo možnost, respektive nutnost připojení externích ovladačů krokových motorů, již jinými integrovanými ovladači krokových motorů deska nedisponuje. Z výše uvedeného vyplývá, že je zde zajištěna i hardwarová podpora pro použití dvou extrudérů, a to proto, že se na desce nachází dva výstupy pro připojení dvou topných těles, dva vstupy pro termistory, jež jsou uvnitř tiskové hlavy, a taktéž jsou zde dva vstupy pro čidla tiskové struny (filamentu). [31]

Dále řídicí deska obsahuje obvyklé vstupy a výstupy, jakož je výstup pro vyhřívanou podložku, vstup pro termistor sledující teplotu vyhřívané podložky a vstup pro napájecí napětí. Výhodou je, že deska může být napájena napětím o velikosti jak 12 V tak i 24 V. Toto napětí je pak na desce vyvedeno pro další možné použití na zvláštní konektor. V případě zkonstruované delta 3D tiskárny je tato řídicí deska stejně jako ostatní elektronika napájena napětím 12 V. Na řídicí desce je taktéž přítomen konektor pro připojení ventilátorů, jež jsou umístěny na tiskové hlavě a 4 konektory pro koncové spínače. Jejich mód, tedy jestli se bude jednat o spínače maximálního nebo minimálního rozsahu pohybu v dané ose, je nastavitelný přes firmware řídicí desky. Mezi neobvyklé vstupy patří vstup pro automatické vypnutí a vstup pro detekci napájení, kdy může být řídicí deska propojena s UPS záložním zdrojem. Řídicí deska může být taktéž osazena externím Wi-Fi modulem, přičemž může být ovládána skrze výrobcem dodávanou mobilní aplikaci. Mimo to je na řídicí desce přítomen USB konektor typu B pro spojení desky s počítačem. Ovládána pak je skrze standardní volně šiřitelný univerzální software Repetier, který je jednou z nejpoužívanějších aplikací pro ovládání 3D tiskáren. Proces 3D tisku je možné provést i bez připojení řídicí desky k počítači, pro tento účel je přímo na řídicí desce přítomen slot pro SD kartu. Navíc je možné připojit ještě jeden další externí slot pro SD kartu ke konektoru umístěném na řídicí desce, tato možnost však u zkonstruované delta 3D tiskárny nebyla využita. K řídicí desce je pomocí FFC flex kabelu připojen 3,2“ barevný plně grafický kapacitní dotykový LCD displej o rozlišení 320 x 240 pixelů, jež je součástí řídicí desky, a tedy je od stejného výrobce. [31]

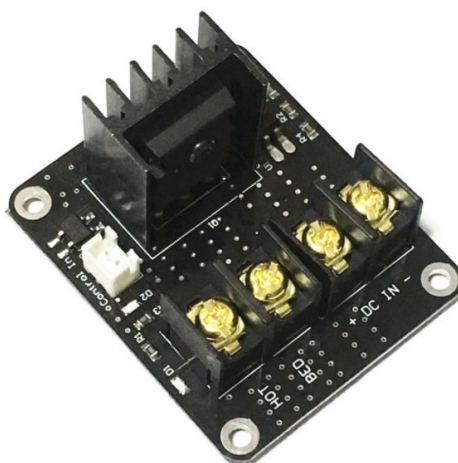
V předchozích odstavcích byla uvedena hardwarová výbava řídicí desky včetně uvedení jejích možností a výhod z pohledu uživatele. Avšak úplně tou nejzásadnější komponentou na každé řídicí desce je mikroprocesor, na němž je závislá velká část hardwarové výbavy řídicí desky. Zde u této řídicí desky MKS Robin Nano je použit 32bitový mikroprocesor ARM Cortex-M3, konkrétně tedy jeho varianta STM32F103ZET6. Jeho některé základní parametry jsou uvedeny v tab. 4, kde jsou zároveň porovnány s parametry nejčastějšího řešení řídicí desky u 3D tiskáren Arduinem Mega 2560, kde je použit mikroprocesor ATMEGA2560. Na první pohled jsou zde dobře patrné výhody řídicí desky MKS Robin Nano u zkonstruované delta 3D tiskárny v podobě vyššího výpočetního výkonu, větší paměti mikroprocesoru a většího množství vstupně výstupních pinů mikroprocesoru. Taktéž je mikroprocesor ARM Cortex-M3 vybaven větším množstvím komunikačních rozhraní.

Tab. 4: Srovnání řídicích desek [27, 29].

Řídicí deska	MKS Robin Nano	Arduino Mega 2560
Mikroprocesor	ARM Cortex-M3 (32-bit.) (STM32F103ZET6)	ATMEGA2560 (8-bit.)
Pracovní frekvence	72 MHz	16 MHz
Paměť	512 kB FLASH 64 kB SRAM	256 kB FLASH 8 kB SRAM 4 kB EEPROM
Vstupy / výstupy	80 digitálních I/O	54 digitálních I/O 16 analogových vstupů
Rozhraní	5x UART, 2x I ² C, 3x SPI, CAN, USB	4x UART, SPI
Napájecí napětí	3,3 V	5 V

Co se týče možností použití řídicí desky, tak ta svou hardwarovou výbavou a firmwarem dovoluje použití u 3D tiskáren typu delta, kartézského a CoreXY. [31] Na první pohled je tedy zřejmé, že řídicí deska MKS Robin Nano byla vhodnou volbou pro zkonstruovanou delta 3D tiskárnu. Během konstrukce 3D tiskárny se však ukázaly nevýhody 32bitových řídicích desek uvedené v teoretické části této diplomové práce. Nutností bylo modifikovat výrobcem dodávaný firmware včetně vytvoření nových konfiguračních souborů pro zajištění plné funkčnosti zkonstruované delta 3D tiskárny. Překážkou byl i fakt, že rozšířenost a zkušenosti s touto řídicí deskou jsou na poli volně šiřitelných konstrukcí 3D tiskáren velmi malé a při zprovoznění delta 3D tiskárny musel být použit vlastní intuitivní postup. Totéž platilo i o zprovoznění součinnosti řídicí desky s ovládacím počítačovým softwarem Repetier. To vše naštěstí bylo částečně vyváжено funkcí grafické části firmwaru, výbavou, hardwarovými možnostmi řídicí desky a obecně výhodou použití 32bitové řídicí desky v podobě nejenom vyššího výpočetního výkonu.

Přidanou elektronickou komponentou kvůli snížení proudového namáhá řídicí desky je MOSFET modul v provedení zachyceném na obr 19.



Obr. 19: MOSFET modul. [43]

Ten je připojen jednak ke zdroji napájecího napětí, v případě zkonstruované tiskárny ke 12 V, a dále pak k samotné vyhřívané podložce. V tomto případě je svorka na potenciálu země průchozí a svorka 12 V je spínána MOSFET tranzistorem. Zatížitelnost MOSFET modulu je až 20 A při napětí 12 V. [43] Kromě výše uvedeného je na MOSFET modulu ještě přítomna LED signalizace sepnutí výstupu a konektor pro připojení spínacího signálu z řídicí desky. [43] Ten je brán přímo z výstupu řídicí desky určeného pro vyhřívanou podložku. Díky tomuto řešení nedochází k nadměrnému zahřívání spínacích tranzistorů na řídicí desce, což má pozitivní vliv na její životnost.

b) Ovladače krokových motorů a krokové motory.

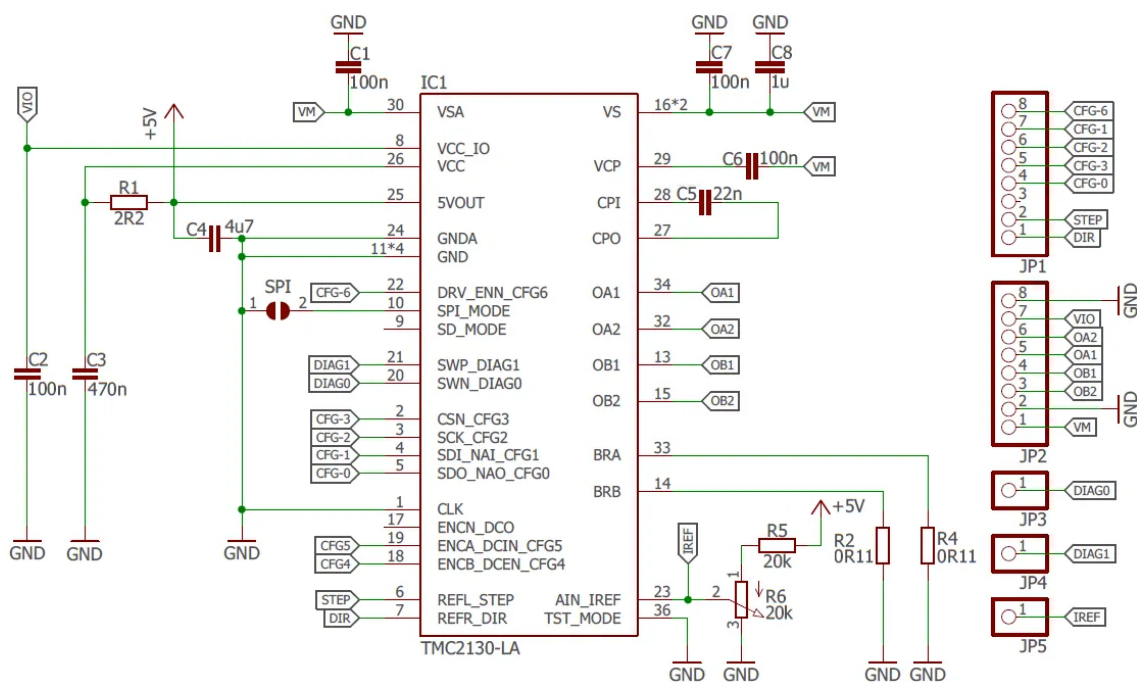
Protože součástí řídicí desky nejsou ovladače krokových motorů, musely být použity celkem 4 kusy externích ovladačů zasunutých do příslušných slotů na řídicí desce. Z nich 3 náleží pro krokové motory zajišťující pohyb v osách Z_1 , Z_2 , Z_3 a jeden pro krokový motor extrudéru. Zvoleny byly ovladače krokových motorů typu TMC2130 od výrobce Trinamic, které patří do skupiny poměrně kvalitních aktuálně dostupných ovladačů krokových motorů. [34] Jejich reálná podoba je na obr. 20.



Obr. 20: Použitý ovladač krokového motoru TMC2130. [34]

Jak už bylo v teoretické části zmíněno, funkcí ovladačů je řídit proud krokovými motory a poskytovat takzvané mikro kroky, čímž jsou eliminovány vibrace krokového motoru. Pro tento účel dovolují ovladače krokových motorů TMC2130 mikro krokování až 1/256, přičemž toto jemné mikro krokování má pozitivní vliv na snížení hlučnosti 3D tiskárny. Dále jsou schopny krokovému motoru dodávat konstantní proud až 1,2 A, nebo špičkově až 2,5 A, při pracovním napětí od 5,5 V do 46 V. Další nespornou výhodou těchto ovladačů krokových motorů je možnost programování a provozu v SPI módu. Použitý integrovaný obvod, zde TMC2130-LA, disponuje tepelnou a nadproudovou ochranou a dalšími funkcemi a je rovněž odolný proti zkratu. [32, 34]

Schéma zapojení ovladače krokového motoru TMC2130 je uvedeno na obr. 21. Zde se kromě již zmíněného integrovaného obvodu TMC2130-LA a konektorů v podobě pinových lišt nachází 8 blokovacích kondenzátorů zajišťujících stabilitu příslušných napětí při proudových špičkách, 4 rezistory a potenciometr pro nastavení klidového proudu procházejícího krokovým motorem. Velikost klidového proudu má vliv na zahřívání ovladače krokového motoru i krokového motoru samotného, nemůže však být příliš malá, jinak by docházelo ke ztrátám kroků motoru.

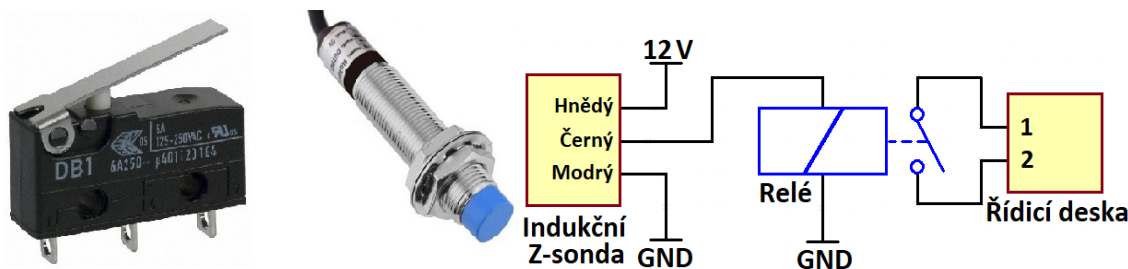


Obr. 21: Obvodové zapojení ovladače krokového motoru TMC2130. [44]

Stejného počtu jako ovladačů krokových motorů je použito i krokových motorů. Jsou tedy použity celkem 4 krokové motory v běžném standardizovaném provedení NEMA17. Použité krokové motory jsou konkrétně typu 42HB40-401A, kdy délka krokového motoru je 40 mm a průměr hřídele je 5 mm. Každý z použitých krokových motorů pak disponuje následujícími parametry udávanými výrobcem, a to kroutícím momentem 0,5 Nm, maximálním stálým proudem jednou fází 1,2 A, odporem vinutí jedné fáze 3,9 Ω a indukčností vinutí jedné fáze 7,8 mH. K řídicí desce, respektive k ovladačům krokových motorů, je každý krokový motor připojen čtyřmi vodiči. [45]

c) Použitá senzorka.

Poslední oblastí použité elektroniky u zkonstruované delta 3D tiskárny je oblast senzorky. Zde byly pro koncové spínače v osách Z_1 , Z_2 , Z_3 a senzor tiskové struny (filamentu) použity obyčejné mechanické spínače typu DB1C-A1LB [46], viz obr. 22, které jsou i přes své nevýhody uvedené v kapitole 5 dostačující. Navíc k této volbě bylo nutné přistoupit z důvodu menšího použitelného prostoru pro tyto spínače. U Z-sondy byl pak použit bezkontaktní indukční snímač v kombinaci se spínacím relé, schéma jeho zapojení je uvedeno na obr. 22 vpravo. Pro snímání teploty vyhřívané podložky a teplého konce tiskové hlavy byly použity NTC termistory o velikosti 100 k Ω .



Obr. 22: Mechanický spínač vlevo, indukční snímač a jeho zapojení vpravo. [46, 47]

d) Krabíčka pro řídicí elektroniku

Pro pohodlné používání delta 3D tiskárny a ochranu řídicí elektroniky před vnějšími vlivy byla navržena krabíčka pro řídicí elektroniku. Tato krabíčka je následně přišroubována k přední části delta 3D tiskárny a spolu s dotykovým displejem tvoří pomyslný ovládací panel 3D tiskárny. 3D model krabíčky na elektroniku je na obr. 23.



Obr. 23: 3D model krabíčky na elektroniku.

Uvnitř této krabíčky je umístěna řídicí deska a MOSFET modul a jsou zde také volné pozice pro 40 mm ventilátory, které však u sestavené verze nakonec použity nebyly. Horní stranu krabíčky pak kryje snímatelné víko s přišroubovaným displejem. Díky množství volných průchodů v bočních stranách a na horní straně víka je zajištěno dobré chlazení elektroniky. Ze přední strany je pak přístup k USB konektoru a slotu pro SD kartu. Krabíčka je vyrobená pomocí 3D tisku ze šedého plastu PLA. Její reálná sestavená podoba, avšak bez víka, je uvedena na obr. 24.



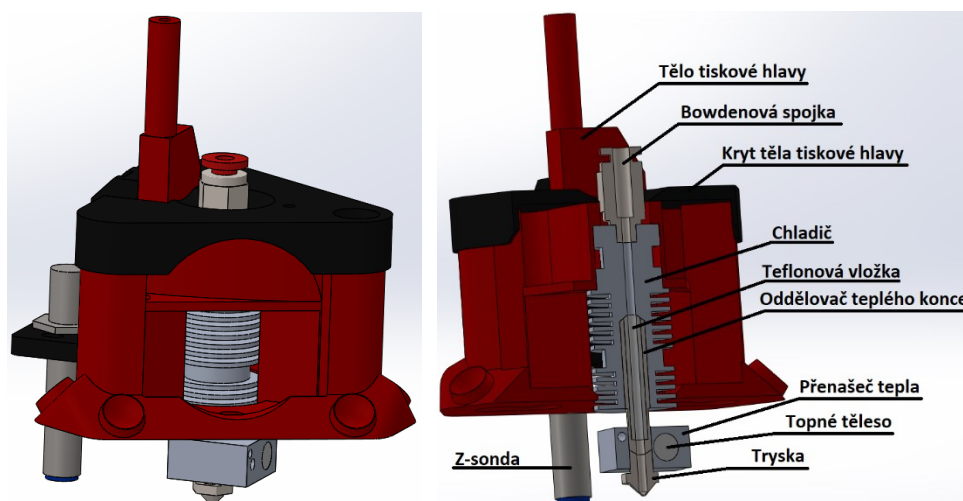
Obr. 24: Fotografie sestavené krabíčky pro elektroniku.

7.2 Návrh topných částí delta 3D tiskárny

Při konstrukci delta 3D tiskárny bylo zapotřebí se detailně věnovat návrhu tiskové hlavy a vyhřívané podložky. V případě tiskové hlavy bylo nutné vytvořit takovou její konstrukci, respektive tělo, aby nedošlo k jeho roztavení při zahřátí teplého konce. V případě tiskové podložky zase byla důležitá homogenita jejího prohřátí, což má vliv na rozdílnou teplotní roztažnost a tím i na deformace tištěného předmětu. Pro návrh těchto topných částí byly použity teplotní simulace prostřednictvím CAD systému SolidWorks, tedy přesněji pomocí jeho nástroje Flow Simulation.

7.2.1 Návrh tiskové hlavy

Prvním krokem před provedením samotné simulace bylo nastavení jejich parametrů a okrajových podmínek. Taktéž musel být vytvořen zjednodušený 3D model tiskové hlavy, kde byly zanedbány pouze ty součásti, které na její teploty nebo proudění ohřátého vzduchu nemají vliv, například kuličky pro přichycení ramen nebo úchyt kabelového svazku. Na obr. 25 je však pro lepší představu dizajnu tiskové hlavy uveden její kompletní 3D model.



Obr. 25: Kompletní 3D model tiskové hlavy (vlevo) a její řez (vpravo).

Použit byl standartní chladič teplého konce tiskové hlavy s bowdenovou spojkou, mosazná tryska o průměru 0,4 mm a topné těleso určené na napájecí napětí 12 V s příkonem 40 W. Dále byly v prostřední SolidWorks Flow Simulation nastaveny všechny základní parametry simulace, jež jsou uvedeny v tab. 5. Následně pak byly přiděleny materiály k jednotlivým komponentám sestavy tiskové hlavy, viz tab. 6. Při simulaci byly použity 40 mm ventilátory typu FD1240, jejichž P-Q křivka je uvedena na obr. 16. Nakonec před spuštěním simulace byly nastaveny konvergenční kritéria výpočtu, tzv. Goals, a rovněž byla nastavena teplota trysky na 200 °C, což odpovídá teplotě potřebné pro tisk plastu PLA. Důležité bylo sledovat prohřátí celé tiskové hlavy a zjistit, zda nedojde k nadměrnému tepelnému namáhání těla tiskové hlavy, kdy by mohlo v krajním případě dojít k jeho roztavení. A to při osazení i neosazení tiskové hlavy ventilátory. V krajním případě by byla zapotřební úprava

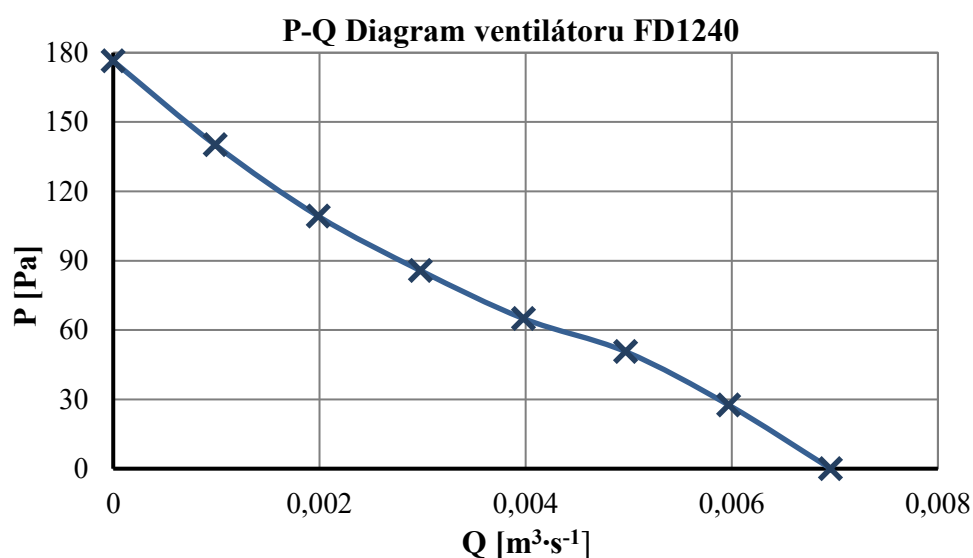
dizajnu těla tiskové hlavy, nebo jeho výroba z jiného materiálu. Pro zpřesnění výpočtu byla potřebná výpočetní síť zjemněna a celkem bylo vygenerováno 1375130 buněk.

Tab. 5: Nastavení simulace – tisková hlava.

Jednotkový systém	SI Změna u jednotky teploty z K na °C
Typ analýzy	Externí
Fyzikální vlastnosti	Přenos tepla v pevných látkách Gravitace v ose Y = -9,81 m·s ⁻²
Výchozí pevná látka	PLA
Výchozí tekutina	Vzduch
Rozlišení sítě	5násobek + lokální zjemnění
Počáteční a okolní podmínky	Teplota trysky 200 °C, ostatní podmínky ponechány beze změny (bez proudění, teplota 20,05 °C)

Tab. 6: Nastavené materiály jednotlivých částí tiskové hlavy.

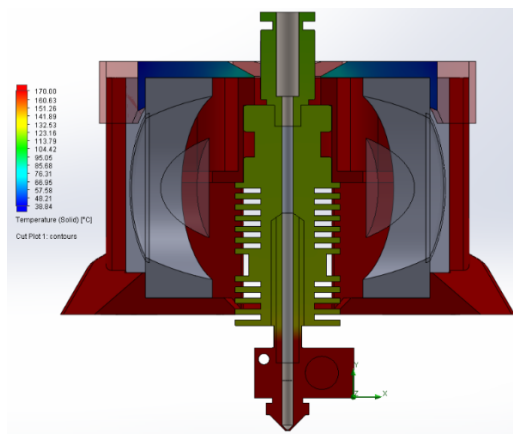
Materiál	Komponenta	Tepelná vodivost (W·m ⁻² ·K ⁻¹)
Hliník	Držák topného tělesa Chladič	229
Mosaz	Tryska	120
Ocel	Topné těleso Bowdenová spojka Oddělovač teplého konce	46
PLA	Tělo tiskové hlavy Kryt tiskové hlavy	0,13
Teflon	Vložka	0,23



Obr. 26: P-Q křivka ventilátoru FD2140.

a) Tisková hlava neosazená ventilátory

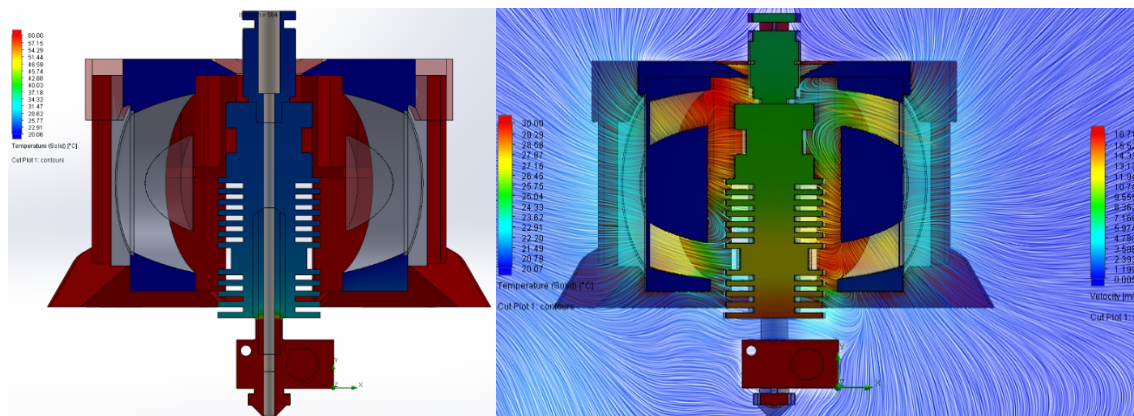
V prvním případě byla simulována tisková hlava ve stavu, že by na ní nebyly použity ventilátory, například kvůli snížení hlučnosti. Jak je z výsledků na obr. 27 patrné, dochází zde k výraznému zahřívání studeného konce tiskové hlavy, tedy celého chladiče, na teplotu přibližně 130 °C. Při této teplotě by už docházelo k měknutí a destrukci celého plastového těla hlavy. Tato varianta proto není vhodná pro použití u zkonstruované delta 3D tiskárny bez dalších úprav nebo změny materiálu těla hlavy.



Obr. 27: Teploty tiskové hlavy bez použití ventilátorů.

b) Tisková hlava s ventilátory

Další volbou bylo osadit tiskovou hlavu ventilátory a celou simulaci zopakovat. Zde jsou již výsledné teploty celé tiskové hlavy dostatečně nízké na to, aby nedošlo k jejímu poškození, viz obr. 28 vlevo. Chladič i celý studený konec tiskové hlavy má teplotu nižší než 30 °C, není tedy zapotřebí dále upravovat dizajn celé tiskové hlavy. Navíc tělo tiskové hlavy může být vyrobeno z plastu PLA. Podmínkou je však osazení dvou kusů ventilátorů pro zlepšení účinnosti chlazení a tím snížení teplot chladiče. Na obr. 28 vpravo je pak vyobrazeno proudění vzduchu uvnitř tiskové hlavy, při použití dvou ventilátorů, získané pomocí simulace. Na obrázku je pro lepší názornost posunuté měřítko, takže i přes drobné zkreslení v barevném znázornění, má spodní část chladiče skutečně teplotu nižší než uváděných 30 °C.



Obr. 28: Teploty tiskové hlavy s ventilátory (vlevo), proudění vzduchu (vpravo).

7.2.2 Návrh vyhřívání podložky

Protože v současnosti nejsou komerčně dostupné vyhřívání podložky s potřebnými rozměry vhodnými pro zkonstruovanou delta 3 tiskárnu, bylo nutné takovou vyhřívání podložku navrhnout, ověřit její vlastnosti v teplotní simulaci, případně vybrat z více variant tu nejvhodnější, a nakonec ji vyrobit. Před provedením simulace tedy byly opět vytvořeny 3D modely vyhřívání podložek. Ty jsou uvedeny dále u příslušných simulací. Při jejich tvorbě, co se dizajnu vodivých cest týče, byla brána inspirace od komerčně dostupných modelů. Celkový odpor vodivých cest vyhřívání podložky pak byl navržen tak, aby při napájecím napětí 12 V byl na ní ztrátový výkon v rozmezí 110 až 130 W. Šířka vodivých cest byla zvolena s ohledem na předpokládané použití hliníkového substrátu s tloušťkou mědi 35 μm . Protože každá navržená vyhřívání podložka má rozdílný dizajn cest, bylo zde důležité simulací zjistit rozdílnosti v homogenosti vyhřátí tiskové podložky a vybrat nejvhodnější variantu.

Před simulací byly v prostředí SolidWorks Flow Simulation nastaveny veškeré její základní parametry, viz tab. 7, a k jednotlivým částem tiskové podložky byly přiřazeny příslušné materiály, které jsou uvedeny v tab. 8. U výchozí pevné látky hliníku, který tvoří základní substrát, byla pro správnost výsledků simulace nastavena pouze tepelná vodivost a elektrická nevodivost tak, aby proud podložkou procházel jen měděnými vodivými cestami.

Tab. 7: Nastavení simulace – vyhřívání podložky.

Jednotkový systém	SI Změna u jednotky teploty z K na °C
Typ analýzy	Externí
Fyzikální vlastnosti	Přenos tepla pouze v pevných látkách
Výchozí pevná látka	Hliník (tepelné vodivý, elektricky nevodivý)
Přenos tepla do okolí	Chování vnějších stěn k okolí Koeficient přenosu tepla $5,5 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$
Rozlišení sítě	5násobek + lokální zjemnění
Počáteční a okolní podmínky	Proud vtékající do vyhřívání podložky 3 A, ostatní podmínky ponechány beze změny (bez proudění, teplota 20,05 °C)

Tab. 8: Nastavené materiály jednotlivých částí vyhřívání podložek.

Materiál	Komponenta	Tepelná vodivost ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$)
Hliník	Základní substrát	229
Měď	Vodivé cesty	386

Pro snížení náročnosti simulací byl u všech podložek nastaven stejný vstupní proud na hodnotu 3 A. Možné vzniklé nepřesnosti v rozdílném ztrátovém výkonu na vyhřívání podložkách lze vzhledem k účelu simulace zanedbat. Důležité totiž nebylo sledovat maximální teploty na vyhřívání podložkách, které lze změnit

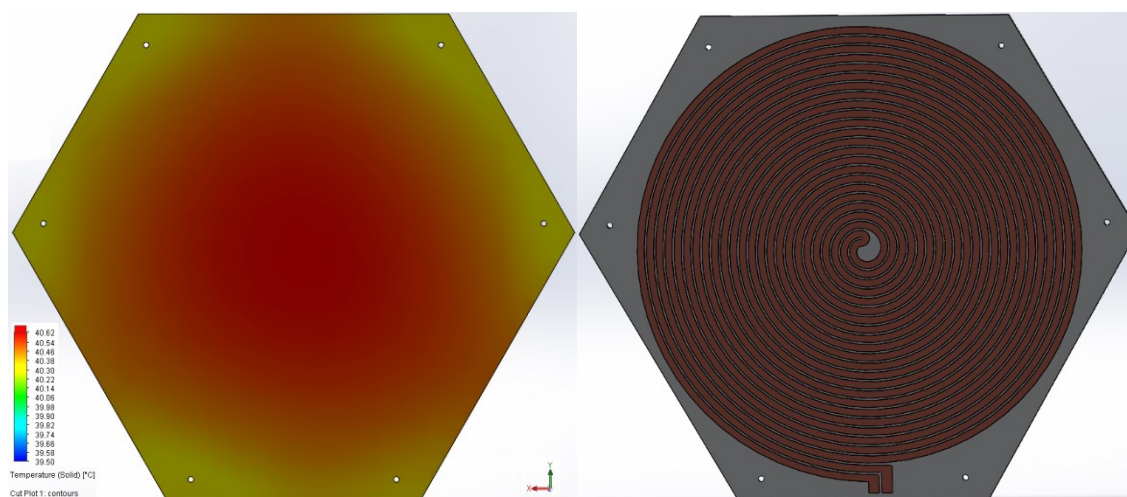
změnou procházejícího proudu, nýbrž bylo důležité sledovat homogenitu prohřátí, respektive teplot na vyhřívané podložce. Posledním nastavením před začátkem simulace bylo nastavení konvergenčních kritérií výpočtu, v tomto případě okamžiku ustálení teplot na vyhřívaných podložkách. Počty vygenerovaných buněk při simulaci a základní parametry navržených tiskových podložek jsou uvedeny v tab. 9, podrobnější parametry jsou pak uvedeny v přílohách na CD.

Tab. 9: Parametry navržených vyhřívaných podložek.

Podložka	Počet buněk	Celkový odpor cest	Výkon při napětí 12 V
Spirálová bifilární	930016	1,223 Ω	117,7 W
Zónová	981028	1,217 Ω	118,3 W
Polygonní	1065717	1,167 Ω	123,4 W

a) Spirálovitá bifilární vyhřívaná tisková podložka

Prvním simulovaným návrhem vyhřívané podložky byla podložka s vodivou cestou tvořící tzv. bifilární vinutí ve tvaru šroubovice, viz obr. 29 vpravo. I přes nižší pracnost návrhu oproti ostatním navrženým vyhřívaným podložkám dosáhla v simulacích tato vyhřívaná podložka poměrně dobrých výsledků. Jak je z rozložení teploty na obr. 29 vlevo patrné, nejteplejší část podložky je přesně v jejím středu, kde je dosaženo teploty přibližně 40,6 °C. Reálná tisková plocha má teplotu od 40,4 °C do 40,6 °C. Nejnižší teplota 40,2 °C je pak na okrajích tiskové podložky. Tyto odchylky teplot jsou však pro potřebné použití zanedbatelné.

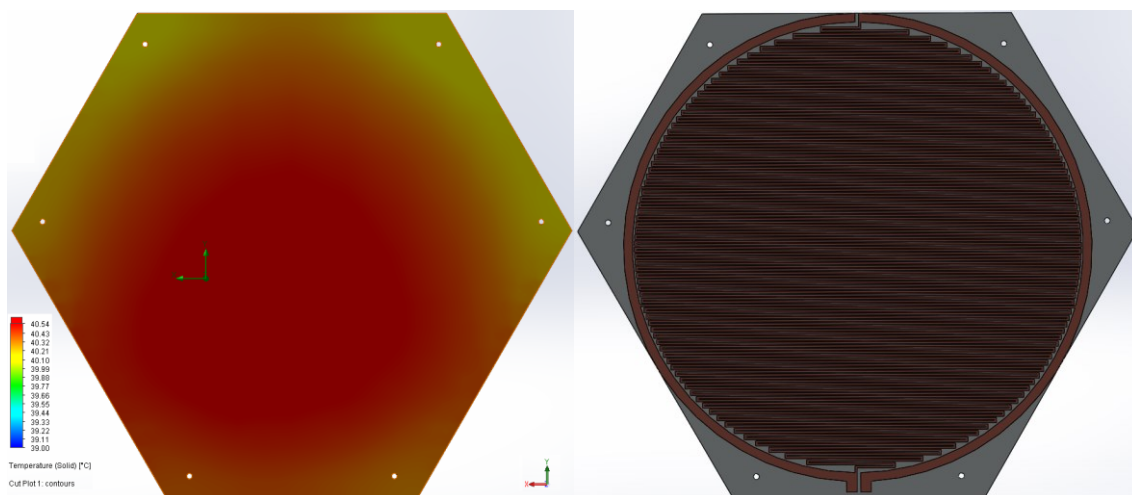


Obr. 29: Návrh vyhřívané podložky – spirálová bifilární.

b) Zónová vyhřívaná tisková podložka

Druhou variantou návrhu vyhřívané podložky byla podložka, kde byly vytvořeny třemi dílčími užšími cestami tři paralelní zóny, viz obr. 30 vpravo. Zde již není nejteplejší část podložky v jejím středu, ale zasahuje k dolnímu okraji, což je patrné z výsledků simulace na obr. 30 vlevo. Rozsah teplot na tiskové podložce je nepatrně větší, než v předešlém návrhu. Maximální teplota je zde přibližně 40,5 °C, minimální teplota

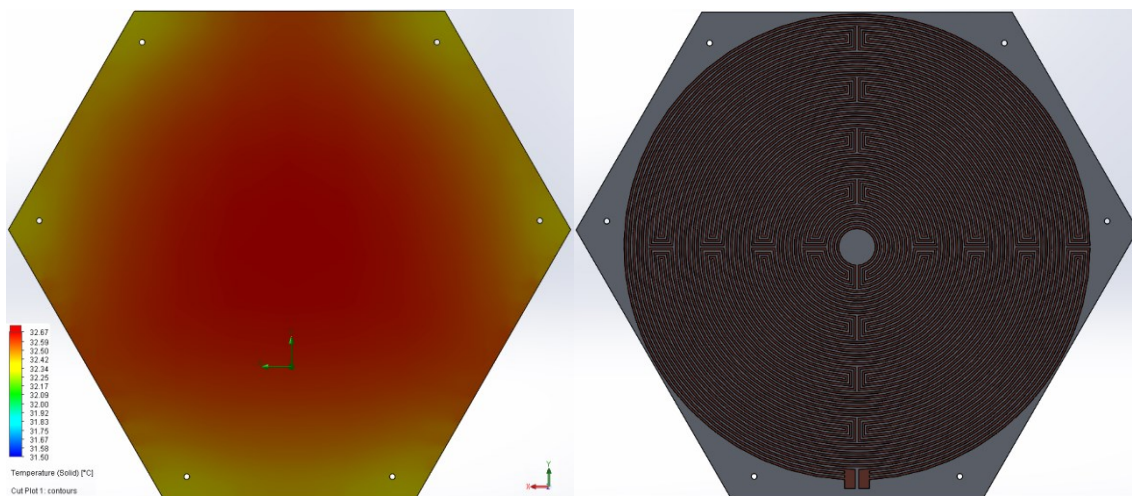
nacházející se na horním okraji vyhřívané podložky pak 40 °C. Reálná tisková plocha má teplotu v rozmezí 40,2 °C až 40,5 °C, což je taktéž dostatečné pro použití u zkonstruované delta 3D tiskárny.



Obr. 30: Návrh vyhřívané podložky – zónová.

c) Polygonní vyhřívaná podložka

Poslední variantou vyhřívané podložky je podložka s trojicí paralelně vedených vodivých cest, jež tvoří útvar podobný bludišti viz obr 31 vpravo. Pro lepší identifikaci je pracovně pojmenovaná jako polygonní vyhřívaná podložka. Z hlediska návrhu se jednalo o nejkomplikovanější a nejpracnější řešení. Co se však rozložení teploty týče, jsou zde výsledky velmi podobné jako v případě simulované spirálovité bifilární podložky. Na rozdíl od ní však zde došlo k zahřátí podložky na nižší maximální teplotu, což je dobře patrné z výsledků simulace na obr. 31 vlevo. K docílení srovnatelného zahřátí a tím i teploty by byl zapotřebí větší procházející proud. Nejvyšší teplota 32,7 °C je dosažena uprostřed tiskové plochy, nejnižší teplota 32,3 °C pak po okrajích tiskové podložky.

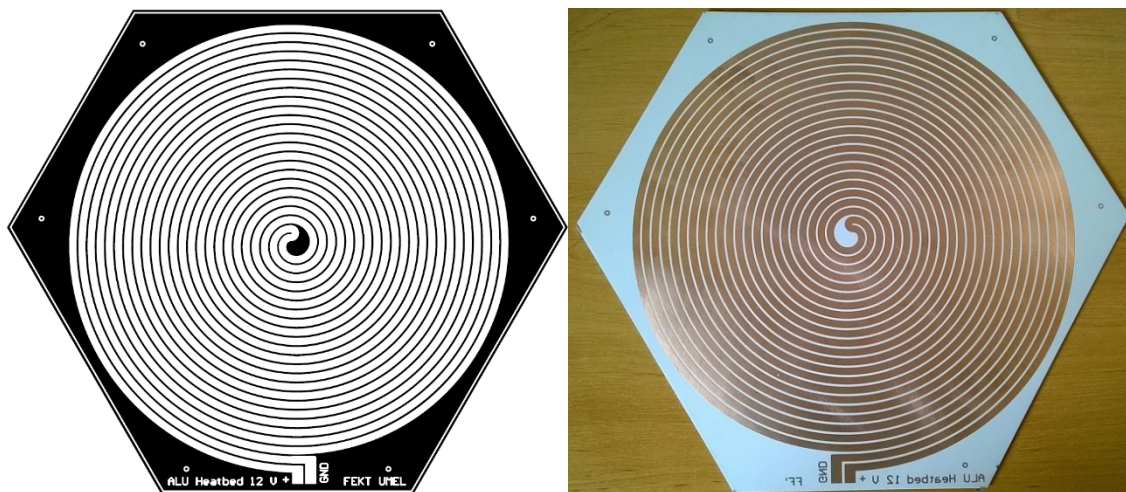


Obr. 31: Návrh vyhřívané podložky – polygonní.

d) Výroba vyhřívané podložky

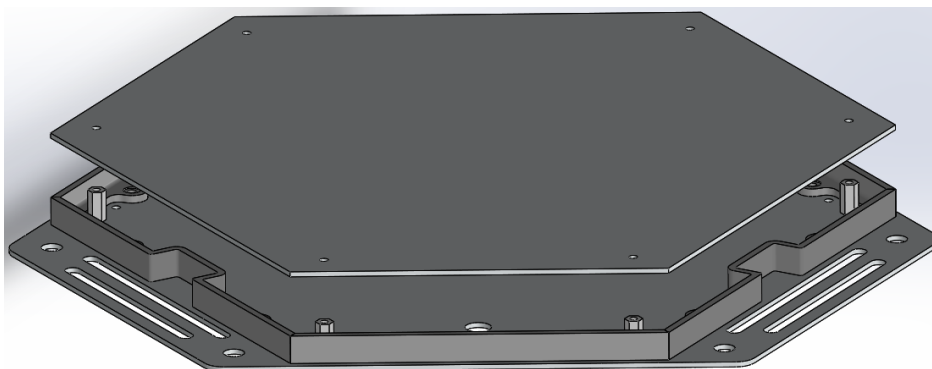
Jako vhodná vyhřívaná tisková podložka byla vzhledem k výsledkům simulací zvolena první simulovaná varianta, a to spirálovitá bifilární podložka. Přispěl k tomu i fakt, že se jednalo z pohledu návrhu o nejjednodušší řešení, navíc s dostatečně silnou cestou, takže při samotné výrobě bylo riziko ztenčení cesty v důsledku podleptání fotorezistu minimální. U ostatních simulovaných návrhů vyhřívaných podložek se ukázala homogenita teplot dostatečná, takže by taktéž byly vhodné pro zamýšlené použití.

3D model spirálovité bifilární vyhřívané podložky byl z CAD systému SolidWorks importován do návrhového systému plošných spojů Altium Designer, kde byly vytvořeny podklady pro samotnou výrobu. Negativní filmová předloha pro výrobu vyhřívané podložky je uvedena na obr. 32 vlevo, ve skutečné velikosti potřebné pro výrobu je pak v příloze na CD. Vyhřívaná podložka byla vyrobena na hliníkovém substrátu o tloušťce 2 mm s měděnou vrstvou 35 μm , viz obr. 32 vpravo.



Obr. 32: Negativní film. předloha (vlevo) a vyrobená vyhřívaná podložka (vpravo).

Na obr. 32 vpravo uvedená vyrobená vyhřívaná podložka byla opatřena nepájivou maskou zabráňující oxidaci vodivých cest a přívodními vodiči. Následně byla sestrojena celková tisková podložka, jejíž sestava je uvedena na obr. 33. Zde stojí za povšimnutí, že vyhřívaná podložka je pomocí 12 mm ocelových distančních sloupků přišroubována k podkladní nosné hliníkové desce, která je šrouby spojena s rámem delta 3D tiskárny. Ze spodní strany po obvodu vyhřívané podložky jsou umístěny kryty z plastu PETG.

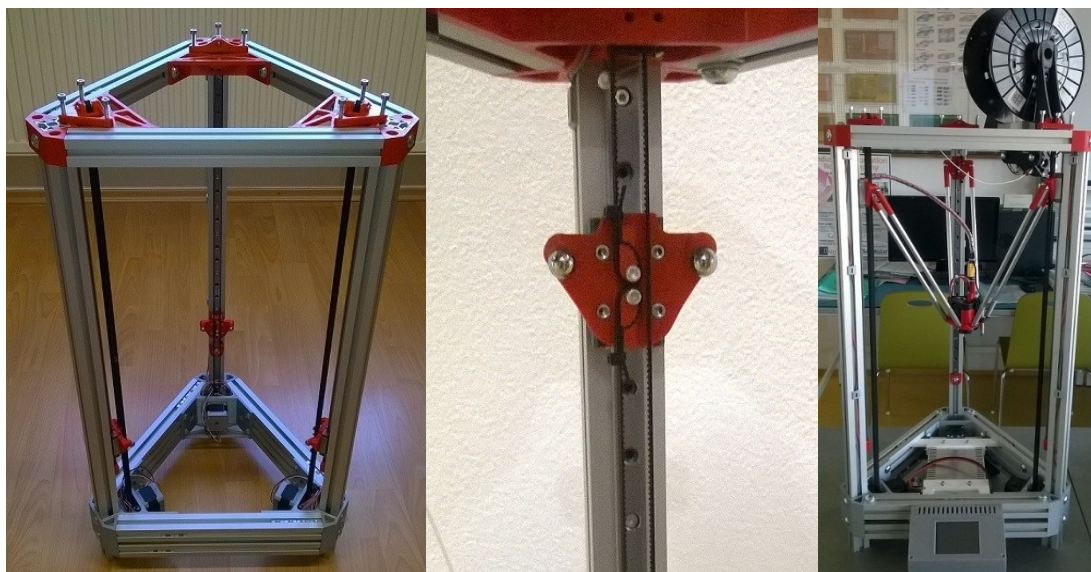


Obr. 33: Sestava kompletní tiskové podložky.

7.3 Výroba delta 3D tiskárny

Po navržení všech nezbytných částí delta 3D tiskárny následovala její samotná výroba. Úplně v prvním kroku proběhlo vytištění všech nezbytných plastových dílů, kdy veškeré plastové díly, až na výjimku v podobě krytů vyhřívané tiskové podložky, byly vytištěny z plastu PLA. Seznam všech tištěných dílů a stejně tak i seznam dalších nezbytných dílů a podklady potřebné pro výrobu delta 3D tiskárny jsou uvedeny v příloze této diplomové práce. Výkres hlavní sestavy delta 3D tiskárny je uveden na obr. 37, výkresy podsestav jsou pak na CD přiloženém k diplomové práci. Vzhledem k tomu, že by bylo zbytečné popisovat celou výrobu delta 3D tiskárny postupně krok po kroku, jsou dále uvedeny fotografie z její výroby s příslušným popisem.

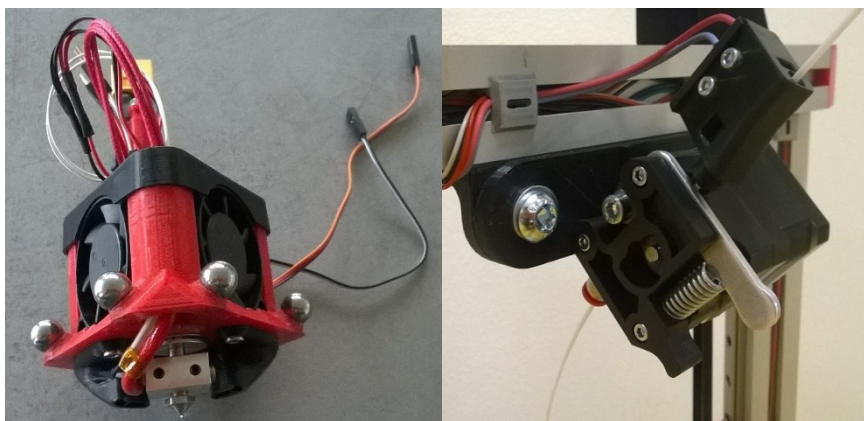
Po přípravě všech potřebných dílů byl sestaven rám delta 3D tiskárny, který je nosnou konstrukcí pro ostatní periferie. Jeho podoba je zachycena na obr. 34 vlevo. Ve spodních plastových rozích jsou umístěny krokové motory, na horních pak napínáky řemenů. Ty společně s lineárním vedením a úchyty ramen tvoří pohybový systém delta 3D tiskárny. Použity zde byly řemeny a 16 zubové řemenice GT2 a 500 mm lineární vedení. Na každém úchyty ramen jsou přilepeny dvě ocelové kuličky pro přichycení magnetických ramen, viz obr. 34 uprostřed. Koncové spínače jsou umístěny v horních plastových rozích 3D tiskárny, krabička síťové zásuvky pak na pravé dolní části rámu.



Obr. 34: Sestavení rámu delta 3D tiskárny.

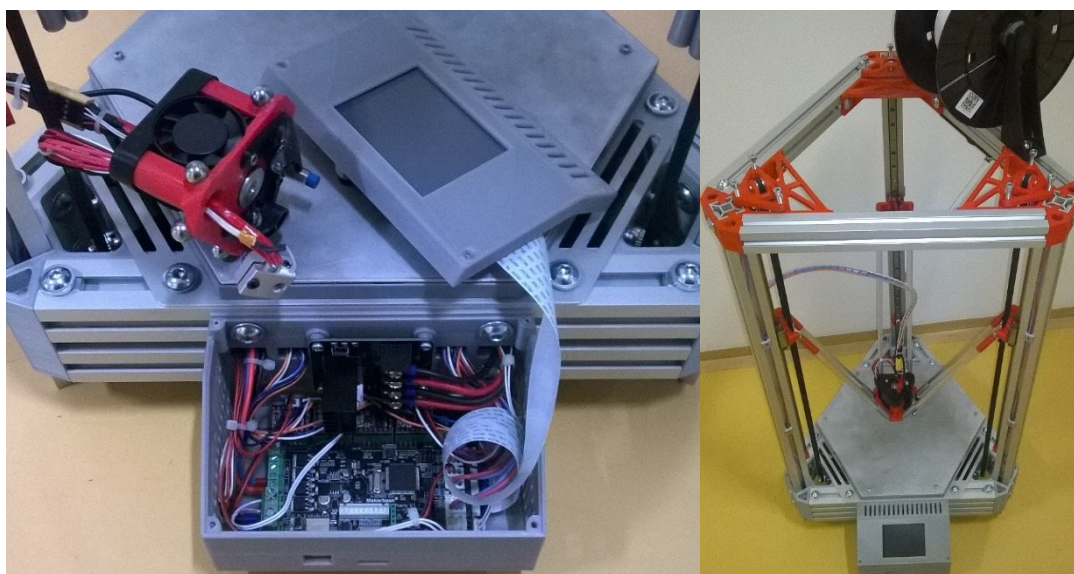
Navržená krabička pro řídicí elektroniku včetně samotné řídicí elektroniky je přišroubována k přední dolní části rámu, viz obr. 34 vpravo, což se ukázalo jako nejvhodnější místo pro její umístění. Napájecí zdroj je umístěn na úchytech ve spodní části delta 3D tiskárny uvnitř rámu. K pravé horní části rámu delta 3D tiskárny je přišroubován extrudér včetně čidla přítomnosti tiskové struny. Jejich detailní vyobrazení je na obr. 35 vpravo. K této části rámu delta 3D tiskárny je rovněž na vhodném místě přišroubován držák pro cívku s tiskovým materiálem. Záběr na celou delta 3D tiskárnu z průběhu její kompletace je zachycen na obr. 34 vpravo.

Co se týče sestavené tiskové hlavy, její podoba je zachycena na obr. 35 vlevo. Jsou zde dobře patrné nalepené ocelové kuličky, ke kterým bude pomocí magnetu přichycen druhý konec ramene. Taktéž je tisková hlava opatřena konektory pro snadné připojení a odpojení jejího kabelového svazku. Nelze však zde vidět indukční Z-sondu, protože je z druhé strany tiskové hlavy. Její podoba je částečně patrná z obr. 36 vlevo nebo z 3D modelu tiskové hlavy v kapitole 7.2.1. Výroba rámu delta 3D tiskárny, tiskové hlavy, extrudéru, krabičky pro elektroniku a celé tiskové podložky probíhala souběžně nezávisle na sobě. Tyto jednotlivé celky pak byly postupně přišroubovány k rámu delta 3D tiskárny a elektricky spojeny potřebnými příslušnými kabely.

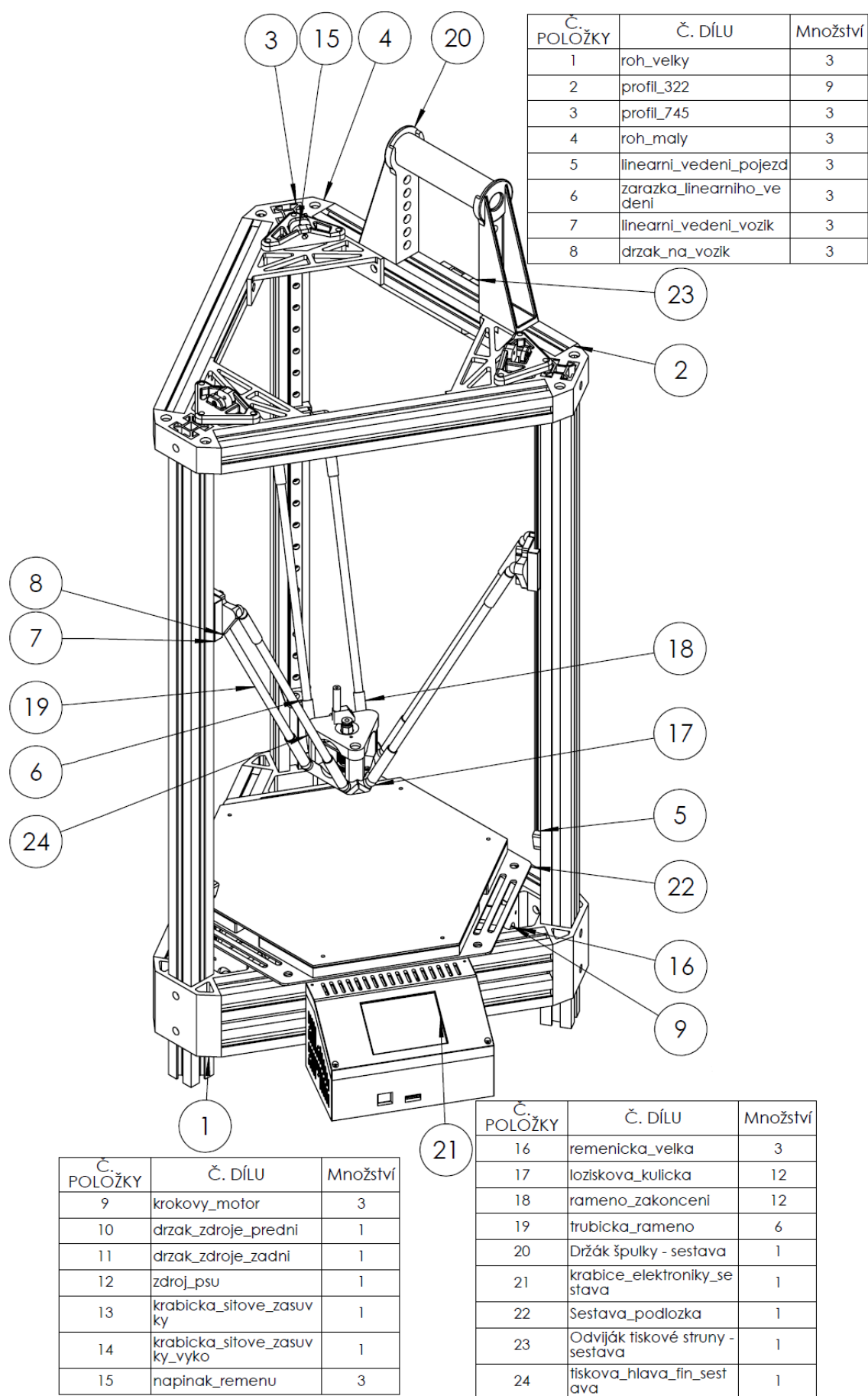


Obr. 35: Sestavená tisková hlava (vlevo) a extrudér (vpravo).

Detail krabičky pro řídicí elektroniku a detail tiskové hlavy je rovněž uveden na obr. 36. Zde lze taktéž vidět přišroubování celé sestavy tiskové podložky k rámu delta 3D tiskárny do prostoru nad napájecí zdroj. Ten je tímto z horní strany uzavřen, a tak pro zajištění nejen jeho lepšího chlazení, ale i lepšího chlazení krokových motorů, musela být podkladní deska tiskové podložky opatřena větracími otvory. Celá sestavená delta 3D tiskárna připravená na kalibraci je uvedena na obr. 36 vpravo.



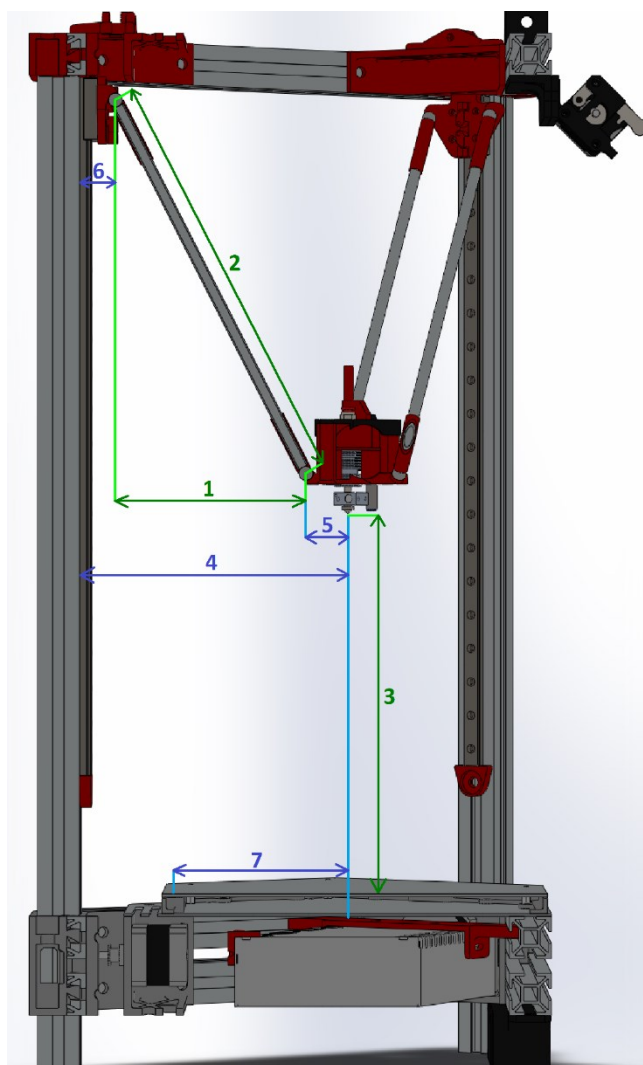
Obr. 36: Detail spodní části (vlevo) a kompletní delta 3D tiskárna (vpravo).



Obr. 37: Výkres hlavní sestavy delta 3D tiskárny.

7.4 Zprovoznění a kalibrace delta 3D tiskárny

Všeobecně každá 3D tiskárna kromě hardwarových komponent obsahuje pro správnou funkci neméně důležitý firmware a příslušný ovládací software. Před uvedením do reálného provozu musí být také patřičně odzkoušena a zkalibrována. Tento postup byl rovněž proveden i u sestavené delta 3D tiskárny. V prvním kroku musel být modifikován výrobcem dodávaný firmware řídicí desky, protože se ukázal pro potřebné použití u sestavené delta 3D tiskárny jako nefunkční. Rovněž byl vytvořen zcela nový konfigurační soubor obsahující nastavení celé delta 3D tiskárny. Protože hlavním cílem diplomové práce není popis použitého firmwaru a jeho potřebných úprav u sestavené delta 3D tiskárny, bude dále uvedeno pouze důležité nastavení základní geometrie delta 3D tiskárny v konfiguračním souboru. Potřebné základní rozměry geometrie sestavené delta 3D tiskárny potřebné pro konfigurační soubor jsou zaznačeny na obr. 38.



Obr. 38: Nákres rozměrů delta 3D tiskárny potřebných pro konfigurační soubor.

Všechny tyto základní rozměry geometrie delta 3D tiskárny byly získány z vytvořeného 3D modelu a následně zapsány na příslušné řádky konfiguračního souboru. Konkrétní podoba zápisu zdrojového kódu je pak uveden níže, kde číselná

hodnota značí daný rozměr v milimetrech, číslo v závorce na konci řádku pak odpovídá číselnému označení rozměrů zaznačených na obr. 38. Je třeba taktéž podotknout, že se jedná o obecné parametry nastavované ve firmwarech všech delta 3D tiskáren, tudíž jednotlivé řádky, respektive geometrické rozměry, zde mají obecně platný název. Kalibrační rádius delta 3D tiskárny uvedený na posledním řádku zdrojového kódu byl zvolen jako 80 % maximálního poloměru tisku.

```
#define DELTA_DIAGONAL_ROD 299 //Délka ramene mezi středy rotace (2)
#define DELTA_SMOOTH_ROD_OFFSET 192 //Vzdálenost trysky od rámu (4)
#define DELTA_EFFECTOR_OFFSET 30 //Vzdálenost tryska, hlava-rotace (5)
#define DELTA_CARRIAFE_OFFSET 27 //Vzdálenost úchyt-rotace, rám (6)
#define DELTA_RADIUS 135 //Vymezený poloměr úchyty-rotace (1)
#define DELTA_HEIGHT 271 //Max. vzdálenost tryska-podložka (3)
#define DELTA_PRINTABLE_RADIUS 120 //Max. poloměr tisku (7)
#define DELTA_CALIBRATION_RADIUS 96 //Kalibrační poloměr
```

Rovněž byly vypočítány a následně nastaveny počty kroků na 1 mm pohybu v jednotlivých osách. Zde u sestavené delta 3D tiskárny šlo o nastavení počtu kroků v osách Z_1 , Z_2 , Z_3 , (ve firmwaru značeny X, Y, Z), ve kterých se pohybují jednotlivá ramena držící tiskovou hlavu, a dále také u extrudéru E0. Zdrojový kód obsahující toto nastavení je uveden níže. Počty kroků na 1 mm byly vypočítány rovnicemi 5 a 6.

```
#define DEFAULT_X_STEPS_PER_UNIT 100 //Počet kroků na 1 mm pohybu X
#define DEFAULT_Y_STEPS_PER_UNIT 100 //Počet kroků na 1 mm pohybu Y
#define DEFAULT_Z_STEPS_PER_UNIT 100 //Počet kroků na 1 mm pohybu Z
#define DEFAULT_E0_STEPS_PER_UNIT 141 //Počet kroků na 1 mm pohybu E0
```

Ještě před výpočtem počtu kroků na 1 mm pohybu bylo na ovladačích krokových motorů nastaveno mikro krokování. To bylo pro účel kalibrace a testování sestavené delta 3D tiskárny nastaveno na 1/16, což je jednak dostatečné pro přesnost tisku, která se v tomto případě pohybuje na úrovni 0,01 mm, ale navíc je možné při tomto nastavení ovladače krokových motorů provozovat v tzv. tichém módu. Samozřejmě pro pozdější provoz delta 3D tiskárny lze počet mikro kroků zvýšit, ovladače krokových motorů totiž dovolují až 1/256 mikro kroku. Je však nutné při provozování ovladačů krokových motorů v tichém režimu vzít v úvahu fakt, že se zvyšováním počtu mikro kroků je třeba snížit rychlost pohybu v daných osách tak, aby ovladač krokových motorů mohl i nadále pracovat v tichém režimu. To je uvedeno v katalogovém listu výrobce. [44] Údaji potřebnými pro výpočet pak je počet kroků krokových motorů na jednu svou otáčku, což v případě použitých motorů typu 42HB40-401A je 200 kroků a dále počet a rozteč zubů použitých řemenic. Použity jsou zde 16 zubové řemenice GT2, s roztečí zubů 2 mm. Výpočet počtu kroků na 1 mm pohybu v osách Z_1 , Z_2 a Z_3 $N_{krok/1mm(Z)}$ je uveden v následující rovnici 5 [15], kde $N_{zubů}$ [-] je počet a d_r [-] je rozteč zubů na použité řemenici, N_{motor} [-] je počet kroků krokového motoru na jednu svou otáčku a N_{driver} [-] je počet mikro kroků nastavených na ovladači krokových motorů.

$$N_{krok/1mm(Z)} = \frac{N_{motor} \cdot N_{driver}}{N_{zubů} \cdot d_r} = \frac{200 \cdot 16}{16 \cdot 2} = 100 [-] \quad (5)$$

Pro stanovení počtu kroků na 1 mm pohybu u extrudéru $N_{krok/1mm(E0)}$ bylo zapotřebí znát průměr kruhového ozubení podávacího kolečka tiskové struny. Zde u sestavené delta 3D tiskárny bylo použito podávací kolečko MK8 s průměrem kruhového ozubení $d_k = 7,2$ mm. Výpočet je uveden v následující rovnici 6 [15].

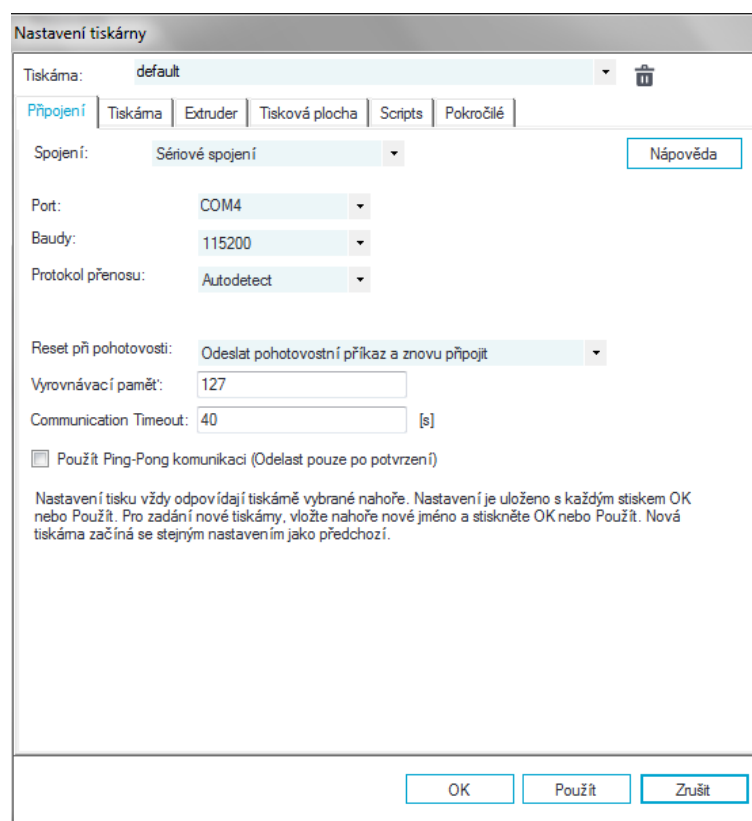
$$N_{krok/1mm(E0)} = \frac{N_{motor} \cdot N_{driver}}{\pi \cdot d_k} = \frac{200 \cdot 16}{\pi \cdot 7,2} = 141,47 \approx 141 [-] \quad (6)$$

Velmi důležitým nastavením po implementaci firmwaru do řídicí desky a prvním zapnutí delta 3D tiskárny bylo nastavení klidového proudu I_{0rms} [A] procházejícího krokovými motory. Tento klidový proud je přímo úměrný referenčnímu napětí U_{ref} [V], viz vztah pro výpočet klidového proudu udávaný výrobcem ovladačů krokových motorů TMC2130 uvedený v rovnici 7 [48]. Referenční napětí je pak nastavitelné zvlášť u každého ovladače krokového motoru příslušným trimrem.

$$I_{0rms} = U_{ref} \cdot 0,71 \text{ [A]} \quad (7)$$

Výrobcem ovladačů krokových TMC2130 doporučuje referenční napětí volit v rozsahu 0,5 V až 2,4 V. [48] Důležité je však nastavit v tomto rozmezí takové referenční napětí, respektive klidový proud krokovým motorem, aby jednak nedocházelo ke ztrátě kroků vlivem malého proudu, ale zase aby také nedocházelo k přílišnému zahřívání krokových motorů vlivem velkého klidového proudu.

Dalším krokem při ožívování sestavené delta 3D tiskárny bylo její připojení k počítači a následná konfigurace ovládací aplikace Repetier, skrz kterou lze delta 3D tiskárnu ovládat. První okno nastavení aplikace Repetier je uvedeno na obr. 39.



Obr. 39: Nastavení aplikace Repetier – připojení 3D tiskárny.

Co se týče této ovládací aplikace, jedná se o jednu z nejrozšířenějších volně šiřitelných aplikací pro ovládaní 3D tiskáren. Je v ní také podporována celá řada typů 3D tiskáren a jejich řídicích desek. Navíc ovládací aplikace Repetier je mnohdy používána i u komerčně dostupných 3D tiskáren, takže je i mezi uživateli 3D tiskáren poměrně známá.

V prvním okně nastavení aplikace Repetier uvedeném na obr. 39 byl nastaven komunikační port a rychlost komunikace delta 3D tiskárny s aplikací. V dalším okně aplikace uvedeném na obr. 40 byly nastaveny jednotlivé rychlosti posuvu, výchozí teplota extruderu na 200 °C a vyhřívané podložky na 50 °C. Kromě toho jsou zde další podrobnější možnosti nastavení, jejichž použité nastavení je také na obr. 40.

Obr. 40: Nastavení aplikace Repetier – parametry 3D tiskárny.

Dále jsou v aplikaci nastaveny parametry extrudéru, viz obr. 41. Konkrétně zde byl nastaven počet extrudérů a ventilátorů na hodnotu 1, a byla zde omezena maximální teplota extrudéru na 280 °C a maximální teplota vyhřívané podložky na 120 °C. Také zde musel být zadán průměr trysky 0,4 mm.

V posledním uvedeném okně nastavení aplikace Repetier na obr. 42 byl nastaven typ 3D tiskárny pro vizualizaci tisku, zde konkrétně na Rostock Printer (kruhový tvar tisku) a taktéž maximální rozměry tisknutého předmětu, tedy konkrétně maximální tisknutelný rádius 120 mm a maximální tisknutelná výška 260 mm. Ostatní neuvedená okna nastavení aplikace Repetier zůstala bez úprav ve výchozím nastavení. Po těchto nastaveních aplikace Repetier bylo započato s kalibrací sestavené delta 3D tiskárny.

Nastavení tiskárny

Tiskárna: default

Připojení | Tiskárna | **Extruder** | Tisková plocha | Scripts | Pokročilé

Počet extruderů: 1

Number of Fans: 1

Max. Extruder Temperature: 280

Max. Bed Temperature: 120

Max. Volume per second: 12 [mm³/s]

☐ Printer has a Mixing Extruder (one nozzle for all colors)

Extruder 1

Name:

Diameter: 0.4 [mm] Temperature Offset: 0 [°C]

Color:

Offset X: 0 Offset Y: 0 [mm]

OK Použít Zrušit

Obr. 41: Nastavení aplikace Repetier – parametry extrudéru.

Nastavení tiskárny

Tiskárna: default

Připojení | Tiskárna | Extruder | **Tisková plocha** | Scripts | Pokročilé

Printer Type: Rostock Printer (kruhový tvar tisku)

Výchozí X: 0 Výchozí Y: 0 Výchozí Z: 0




Tisknutelný rádius: 120 mm

Tisknutelná výška: 260 mm

Printer Visualization

☐ Show Printer Model

☒ Hide if viewed from bottom

	C:\Program Files\Repetier-Host\data\models\DemoPrinter_1.stl	Výbrat ...	Delete
	C:\Program Files\Repetier-Host\data\models\DemoPrinter_2.stl	Výbrat ...	Delete
	No STL selected	Výbrat ...	Delete

OK Použít Zrušit

Obr. 42: Nastavení aplikace Repetier – nastavení tiskové plochy.

Pro účel kalibrace sestavené delta 3D tiskárny byl vytvořen kalibrační list, který je umístěn v příloze A této diplomové práce a tvoří osnovu standardní kalibrace delta 3D tiskárny, pomocí níž lze kalibraci kdykoliv zopakovat.

Nejprve byl zkalibrován extrudér tiskové struny (filamentu), viz bod A kalibračního listu na obr. 44. Pomocí manuálního ovládání delta 3D tiskárny v aplikaci Repetier bylo zadáno vytlačení 100 mm tiskové struny a následně byl tento vytlačený kus tiskové struny změřen pomocí posuvného měřidla. Protože byla naměřená délka vytlačené tiskové struny jiná, než 100 mm, byla provedena korekce počtu kroků na 1 mm pohybu (DEFAULT_E0_STEPS_PER_UNIT) v konfiguračním souboru firmwaru delta 3D tiskárny. Nově nastavovaná hodnota pak byla vypočítána z poměru zadané a naměřené délky tiskové struny vynásobeným aktuálním počtem kroků, viz příklad výpočtu na kalibračním listu.

Dále byla provedena kalibrace tiskové plochy a také základní geometrie delta 3D tiskárny. Touto kalibrací se zabývá bod B kalibračního listu. Zde byla v definovaných bodech nad tiskovou podložkou nastavována stejná výška trysky od tiskové podložky pomocí manuálního ovládání delta 3D tiskárny v aplikaci Repetier. Opravdová výška trysky od tiskové podložky byla opět změřena pomocí posuvného měřidla a v případě neshod byly provedeny korekce v konfiguračním souboru firmwaru. Pozice definovaných bodů pro kalibraci (značených jako A, B, C, D) jsou včetně potřebných příkazů rovněž uvedeny v přiloženém kalibračním listu.

Další částí kalibrace bylo nastavení přesahu konce Z-sondy od konce trysky. K měření této vzdálenosti bylo použito opět posuvné měřidlo, a v konfiguračním souboru byla upravena hodnota na řádku Z_PROBE_OFFSET_FROM_EXTRUDER. Tato část kalibrace delta 3D tiskárny je uvedena v kalibračním listu v bodě C.

Následně byla pomocí ovládací aplikace Repetier provedena zkouška automatické kalibrace použitím příkazu G29. Zde bylo třeba celou zkoušku několikrát opakovat a bylo důležité sledovat odchylky mezi jednotlivými automatickými kalibracemi.

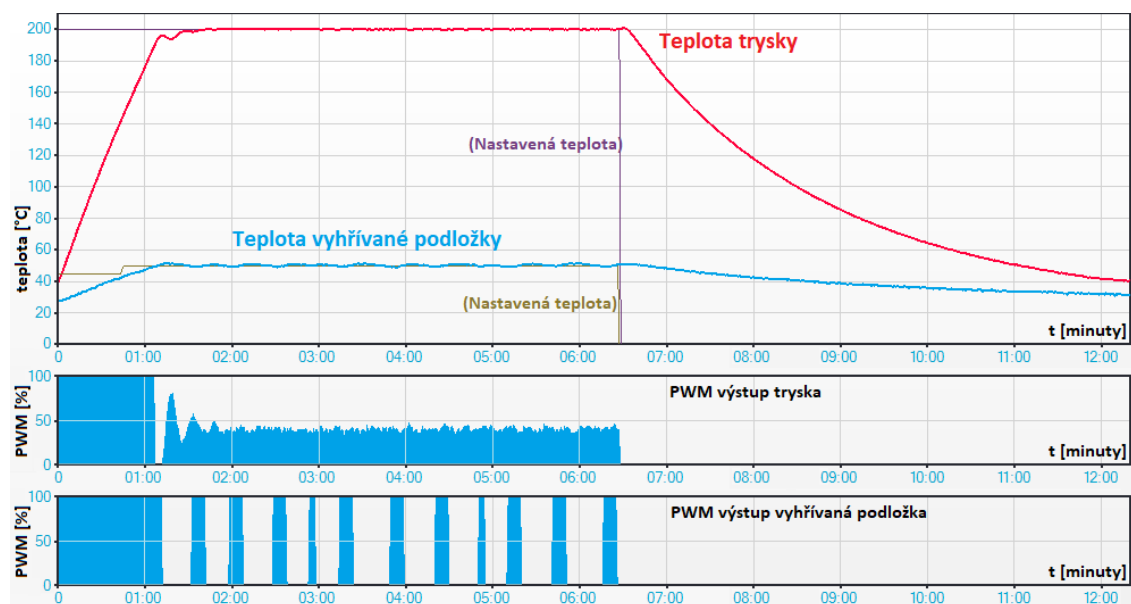
Po dokončení kalibrací sestavené delta 3D tiskárny podle kalibračního listu byl proveden zkušební výtisk kalibrační krychle o délce hrany 10 mm. Ta posloužila k ověření rozměrové přesnosti tisku delta 3D tiskárny. Po jejím změření posuvným měřidlem byly zjištěny odchylky od předpokládaných rozměrů do 0,1 mm. I přes možnou nepřesnost měření lze tedy předpokládat, že skutečná rozměrová přesnost sestavené delta 3D tiskárny je přibližně 0,1 mm, což je srovnatelné s běžně dostupnými 3D tiskárnami. Svůj podíl na odchylkách od ideálních rozměrů má i skutečnost, že sestavená delta 3D tiskárna byla vyráběna ve školních podmínkách, a tak i ona samotná má jisté rozměrové nepřesnosti ovlivňující přesnost výsledného výtisku. Druhým zkušebním výtiskem byla kalibrační lodička, viz obr. 43, která patří mezi volně dostupné zkušební 3D modely, jenž mají vyzkoušet tiskové možnosti 3D tiskárny, respektive jak si 3D tiskárna poradí například s různými vystouplými či zakulacenými tvary. Tyto zkušební 3D modely jsou vždy tištěny bez opor vysutých

částí, tedy 3D tiskárna je nucena je tisknout tzv. do vzduchu. Podle vytištěné lodičky lze konstatovat, že sestavené delta 3D tiskárně její tisk nečinil žádný velký problém. Jedinou nedokonalostí je nerovnoměrný povrch první vrstvy u částí tištěných do vzduchu a samozřejmě již zmiňovaná rozměrová přesnost sestavené delta 3D tiskárny 0,1 mm. Na vytištěném modelu je pozorovatelná určitá hrubost, daná vrstvením jednotlivých vrstev, což je však obecně vlastnost FDM 3D tiskáren. Kromě těchto uvedených nedokonalostí vytištěného modelu u něj další jiné nedokonalosti již shledány nebyly. Vytištěný model kalibrační lodičky je uveden na obr. 43.



Obr. 43: Zkušební výtisk kalibrační lodičky.

Součástí testování sestavené delta 3D tiskárny bylo ověření shody skutečných teplot na vyhřívané podložce a trysce s nastavenými a snímanými teplotami aplikací Repetier. Graficky znázorněné průběhy nastavených a snímaných teplot získaných z aplikace Repetier jsou uvedeny na obr. 44.

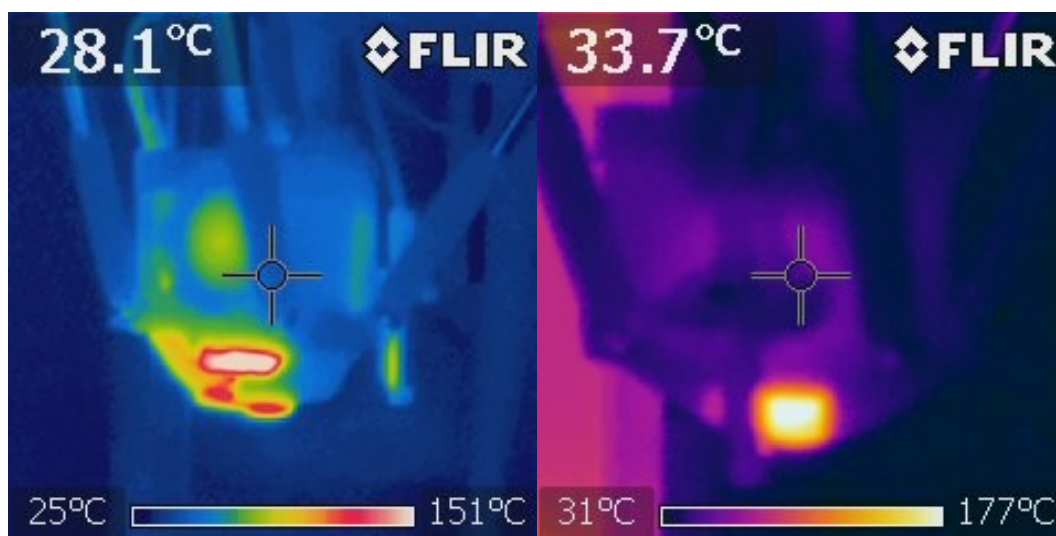


Obr. 44: Průběhy teplot a dodávaných výkonů z aplikace Repetier.

Teploty trysky a vyhřívané podložky byly pro porovnání změřeny bezkontaktním teploměrem. V obou případech byl rozdíl mezi snímanou teplotou aplikací Repetier a naměřenou teplotou bezkontaktním teploměrem maximálně 2 °C, kdy naměřená teplota byla ve všech případech vždy menší. Je třeba však brát v úvahu, že měření teploty bylo zatíženo chybou měření a taktéž, že kvůli špatnému přístupu nebylo měření teploty na trysce zcela ideální. V obou případech tedy snímané teploty aplikací Repetier odpovídají až na malé odchylky skutečným teplotám.

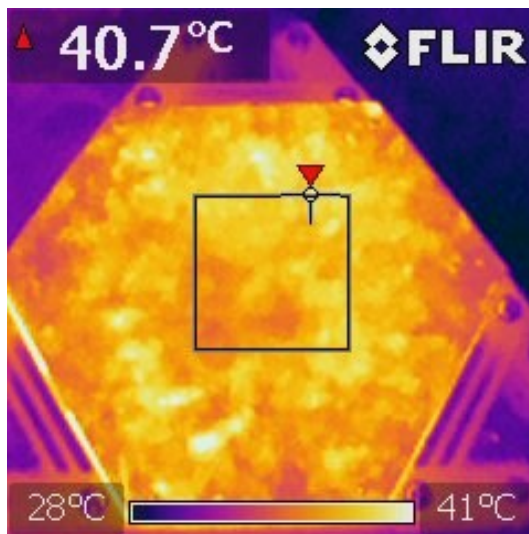
Z průběhů snímaných teplot aplikací Repetier a dodávaných výkonů do topného tělesa a vyhřívané podložky na obr. 44 lze taktéž vidět firmwarové řešení regulace teploty u vyhřívané podložky a trysky. U vyhřívané podložky je regulace teploty řešena pomocí tzv. ON/OFF regulace, kdy je sledovaná teplota držena v určitém rozmezí teplot a při překročení hraniční hodnoty je podle aktuální teploty buď vypnuto nebo zapnuto vytápění trysky. Řešení tohoto typu regulace je poměrně jednoduché, na druhou stranu zde regulovaná hodnota teploty leží uvnitř mezí, a tak má neustále odchylku od požadované teploty. Pro použití u regulace teploty vyhřívané podložky je však toto řešení dostatečné. U trysky je pak regulace teploty řešena pomocí PID regulace, tedy řídicí deska se neustále snaží pomocí PWM modulace měnit hodnotu výkonu dodávaného do topného tělesa tak, aby teplota trysky byla co možná nejblíže ideální požadované teplotě.

Pomocí termokamery byly také, nejen pro ověření správnosti výsledků simulací, změřeny teploty celé tiskové hlavy, viz obr. 45. Zde je vidět rozvržení teploty na tiskové hlavě ve dvou různých barevných spektrech. Hodnoty teplot na trysce, rozvaděči tepla a chladiči jsou zde kvůli značné odrazivosti jejich povrchů spíše orientační. Co je však důležité, jsou teploty těla tiskové hlavy, které odpovídají skutečným. Bylo zde ověřeno, že teplota těla tiskové hlavy vyrobené z plastu PLA v žádném případě nepřekročí kritickou hodnotu teploty, takže nehrozí její deformace nebo případně roztavení. Nejvyšší naměřené teploty jejího těla byla přibližně 34 °C



Obr. 45: Tisková hlava nasnímaná termokamerou.

Stejný postup byl proveden i u tiskové podložky, kdy rozvržení její teploty nasnímané termokamerou je zachyceno na obr. 46. Při tomto měření byla požadovaná teplota nastavena v aplikaci Repetier na 40 °C. Z obr. 46 lze jasně vidět poměrně rovnoměrného rozložení reálné teploty na vyhřívané podložce. Opět se zde však v některých místech projevuje chyba špatného snímání vlivem odrazivosti vyhřívané podložky, která v tomto případě byla na rozdíl od tiskové hlavy sice malá, ale ne zcela zanedbatelná. Na obr 46 je také zachyceno zahřívání rámu sestavené delta 3D tiskárny, který v nejteplejším místě měl přibližně 32 °C, a to při okolní teplotě 26 °C, což se pro budoucí provoz delta 3D tiskárny jeví také jako více než dobré.



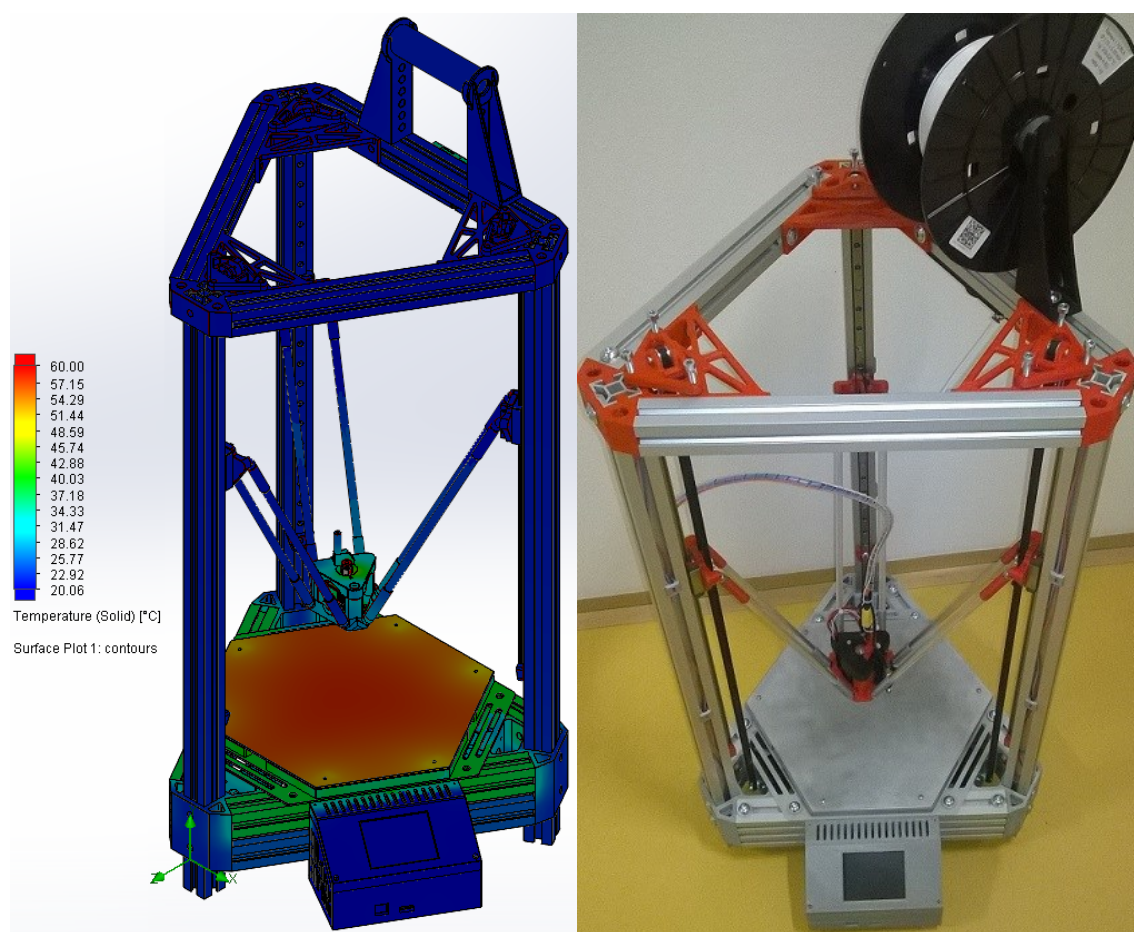
Obr. 46: Vyhřívaná tisková podložka nasnímaná termokamerou.

Také byly otestovány možnosti maximální teploty vyhřívané podložky, kdy vyhřívaná podložka bez problému dovoluje dosažení teploty 120 °C. To je dostatečná teplota k tomu, aby sestavená delta 3D tiskárna umožňovala tisk většiny dostupných plastových materiálů. Parametry vyrobené vyhřívané tiskové podložky, kterými je její odpor a výkon, byly změřeny pomocí digitálního multimetru a následně vypočteny. Jejich skutečné hodnoty jsou rovněž odpovídající teoretickým hodnotám uvedeným v kapitole 7.2.2 v tab. 9 na 2. řádku.

Na závěr byla pro ověření provedena teplotní simulace zahřívání celé sestavy delta 3D tiskárny. Pro tuto simulaci byl použit kompletní 3D model sestavené delta 3D tiskárny. Nastavení simulací pak bylo stejné jako u návrhu tiskové hlavy viz tab. 5 v kapitole 7.2.1. Jediným rozdílem bylo nastavení konstantní teploty u topných částí, tj. u vyhřívané podložky na 60 °C a u topného tělesa v tiskové hlavě na 200 °C. Teplota byla také nastavena u krokových motorů, jakož to zdroje odpadního tepla, na 32 °C. Pro zjednodušení všechny kovové části rámu 3D tiskárny měly při simulaci nastavený materiál ocel nebo hliník v závislosti na reálném materiálu dané části a plastové části plastový materiál PLA. Tisková hlava a vyhřívaná podložka pak měly nastaveny stejné materiály jako při svých předchozích simulacích. Úkolem simulace bylo sledovat prohřívání tohoto modelu až do okamžiku konce růstu teplot.

Výsledky simulace, tedy rozložení teplot v celé sestavě delta 3D tiskárny jsou zachyceny na obr. 47 vlevo. Na tomto obrázku je dobře patrné prohřívání rámu delta 3D tiskárny okolo vyhřívané tiskové podložky. Teplota zde však nedosahuje kritické úrovně, protože je přibližně necelých 40 °C. Velmi podobná teplota pak je i na těle tiskové hlavy, viz obr. 47 vlevo. Co se týče krokových motorů, jejich teplota na konci simulace dosáhla přibližně 33 °C, což odpovídá i reálné teplotě při provozu delta 3D tiskárny.

Nakonec je na obr. 47 vpravo uvedena fotografie sestavené a oživené delta 3D tiskárny, která prošla kalibrací a je tak připravená pro budoucí použití.



Obr. 47: Teplotní simulace (vlevo) a sestavená a oživená delta 3D tiskárna (vpravo).

6 Závěr

Na závěr této diplomové práce je ještě nutné zhodnotit finanční hledisko výroby navržené FDM delta 3D tiskárny. Ještě před jejím samotným návrhem byl vytyčen požadavek, aby cena na její výrobu nepřekročila 10000 Kč. Samozřejmě mohla být také použita řada komponent dostupných na ústavu elektrotechnologie. Výsledný souhrn cen použitých komponent a materiálu na výrobu delta 3D tiskárny je uveden v tab. 10.

Tab. 10: Souhrn cen použitého materiálu pro výrobu delta 3D tiskárny.

Položka	Cena
Hliníkové profily	1500 Kč
Lineární vedení (3 kusy)	2600 Kč
Řídicí deska a displej	1700 Kč
Ovladače krokových motorů	1200 Kč
MOSFET modul	300 Kč
Drobný materiál Spojovací materiál Elektroinstalační materiál	1500 Kč
Napájecí zdroj, krokové motory Filament pro tisk plastových dílů	0 Kč (poskytnuto na ústavu UETE)
Celkem:	8800 Kč

Z této tabulky je zřejmé, že požadavek na maximální cenu sestavené delta 3D tiskárny byl dodržen. Konkrétně všechny kupované komponenty a materiál dohromady vyšly na částku 8800 Kč. Rovněž byla použita řada poskytnutých komponent jako je napájecí zdroj, krokové motory nebo plastová struna z plastu PLA (filament) pro tisk plastových částí sestavené delta 3D tiskárny. V této cenové kalkulaci však není započtena práce a čas strávený výrobou delta 3D tiskárny. V konečném důsledku, pokud by měla být sestavená delta 3D tiskárna komerčně prodáváná, byla by její cena díky strávenému času výrobou mnohem vyšší.

Kromě cenové kalkulace se v této diplomové práci také podařilo splnit všechny cíle kladené na navrženou a sestavenou FDM delta 3D tiskárnu, viz kapitola 6. Byl zde vytvořen její celkový 3D model pomocí CAD systému SolidWorks a tím mohla být optimalizována její konstrukce za účelem velké tuhosti, což má přímý vliv na přesnost výtisků. Jako základní stavební jednotkou konstrukce delta 3D tiskárny byly pro tento účel zvoleny hliníkové profily spojené plastovými elementy. Na této konstrukci jsou pak pevně přichyceny ostatní nezbytné periferie 3D tiskárny, takže je celá její konstrukce poměrně kompaktní a lehce přenosná. Dalším významným prvkem bylo použití lineárních vedení, čímž došlo k vymezení pohybu ramen držící tiskovou hlavu a tím k dalšímu zpřesnění tisku delta 3D tiskárny.

Sestavená delta 3D tiskárna disponuje magnetickou snímatelnou tiskovou hlavou s bowdenem. Není proto problém v případě potřeby tiskovou hlavu jednoduše sejmut,

což je velkým benefitem. Dizajn této tiskové hlavy byl rovněž optimalizován díky teplotní simulaci tak, aby nedošlo při tisku k deformacím jejího těla v důsledku zahřátí trysky. Teplotní simulace byly rovněž použity i při návrhu vyhřívané tiskové podložky. Zde byl vybrán optimální dizajn vodivých cest na vyhřívané podložce tak, aby bylo její vyhřátí co možná nejrovnoměrnější. Tento výsledný vybraný dizajn tzv. spirálové bifilární vyhřívané podložky má při vyhřátí na teplotu 40 °C rozdíl teplot na efektivní tiskové ploše přibližně 0,4 °C, viz kapitola 7.2.2, což omezí rozdílnou teplotní roztažnost tištěného předmětu vlivem rozdílné teploty. Tato tisková podložka vyrobená na hliníkovém substrátu pak disponuje maximálním topným výkonem přibližně 118 W a dovoluje dosažení teploty až 120 °C. Díky tomu je sestavená delta 3D tiskárna schopná tisku všech běžných tiskových plastových materiálů.

Mimo to jsou periferie sestavené delta 3D tiskárny doplněné senzorem přítomnosti tiskové struny (filamentu) a indukční Z-sondou, určenou pro kalibraci delta 3D tiskárny, umístěnou na tiskové hlavě.

Pro ovládání a řízení celé sestavené delta 3D tiskárny byla podle počátečních požadavků vybrána 32bitová řídicí deska MKS Robin Nano. Tato řídicí deska disponuje mnohem vyšším výpočetním výkonem než konvenčně používaná řešení, což je vhodné řešení pro řízení sestavené delta 3D tiskárny, která ze svého principu funkce má zvýšené nároky na výpočetní výkon. Tím bylo možné celý proces tisku značně zrychlit. Nasazení této řídicí desky se však neobešlo bez komplikací v podobě nutnosti značných úprav s ní dodávaného firmwaru a vytvoření zcela nových konfiguračních souborů, čímž nakonec byla zajištěna její správná funkčnost. Pro zlepšení ovládání této delta 3D tiskárny je řídicí deska vybavena barevným dotykovým displejem. Řídicí deska pak byla také doplněna další nezbytnou elektronikou, jakou je MOSFET modul a kvalitní ovladače krokových motorů TMC2130. Pro veškerou řídicí elektroniku byla vytvořena krabička, která je její ochranou proti mechanickému poškození.

Takto sestavená delta 3D tiskárna byla následně zprovozněna, včetně jejího ovládání přes počítačovou aplikaci Repetier a také prošla procesem kalibrace, kde byla odladěna její funkčnost pro co možná nejpresnější 3D tisk. Byly zde rovněž vytištěny kalibrační předměty, a to jednak kalibrační krychle o hraně 10 mm, pomocí níž bylo zjištěno, že tolerance tisku sestavené delta 3D tiskárny je 0,1 mm. Dále pak kalibrační lodička, viz obr. 43, na které nebyly shledány žádné větší nedokonalosti 3D tisku. Na závěr byly ještě ověřeny teploty topných částí sestavené delta 3D tiskárny při procesu 3D tisku pomocí termokamery. Zde bylo jednak zjištěno, že odpovídají nastaveným teplotám prostřednictvím aplikace Repetier ale také, že nedochází k nadměrnému teplenému namáhání sestavené delta 3D tiskárny.

Výstupem této diplomové práce je sestavená a plně zprovozněná FDM delta 3D tiskárna s již uvedenými výhodami a vlastnostmi, disponující velkou rychlostí a přesností 3D tisku. Dalšími součástmi diplomové práce jsou podklady pro její výrobu a vytvořený kalibrační list pro její pozdější kalibraci, který je uveden v příloze A.

Literatura

- [1] PRŮŠA, Josef a Michal PRŮŠA. *Základy 3D tisku* [online]. Prusa Research, 2014 [cit. 2018-11-05]. Dostupné z: <https://www.prusa3d.cz/wpcontent/uploads/zaklady-3d-tisku.pdf>
- [2] Whatis 3D printing?. *3DPrinting.com* [online]. [cit. 2018-11-05]. Dostupné z: <https://3dprinting.com/what-is-3d-printing/>
- [3] Whatis3Dprinting? Thedefinitiveguide. *3D HUBS* [online]. [cit. 2018-11-05]. Dostupné z: <https://www.3dhubs.com/guides/3d-printing/>
- [4] PEARSON, Amada. 10 Advantagesof3DPrinting. *3DINSIDER* [online]. 22.1.2018 [cit. 2018-11-05]. Dostupné z: <https://3dinsider.com/3d-printing-advantages/>
- [5] PEARSON, Amanda. 10 Disadvantagesof3DPrintingTechnology. *3DINSIDER* [online]. 14.1.2018 [cit. 2018-11-06]. Dostupné z: <https://3dinsider.com/3d-printing-disadvantages/>
- [6] REJL, Oldřich. 3D tisk a jeho využití ve stavebnictví. *Tzbinfo* [online]. 2014 [cit. 2018-11-13]. Dostupné z: <https://stavba.tzb-info.cz/11123-3d-tisk-a-jeho-vyuziti-ve-stavebnictvi>
- [7] LIPŠANSKÝ, Jan. 3D tisk se začíná stále více uplatňovat v lékařství. *CAD.cz* [online]. [cit. 2018-11-15]. Dostupné z: <https://www.cad.cz/component/content/article/3738.html>
- [8] HOW 3D PRINTING WORKS?. *MY3DCONCEPTS.COM* [online]. 2017 [cit. 2018-11-15]. Dostupné z: <http://my3dconcepts.com/explore/how-3d-printing-works/>
- [9] VAROTSIS, AlkaivosBournias. *Introduction to Metal 3Dprinting* [online]. [cit. 2018-11-12]. Dostupné z: <https://www.3dhubs.com/knowledgebase/introduction-metal-3d-printing>
- [10] FDM method. *ResearchGate* [online]. [cit. 2018-11-12]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/figure/FDM-method_fig1_270277012
- [11] VAROTSIS, AlkaivosBournias. Introduction to FDM 3Dprinting. *3DHUBS* [online]. [cit. 2018-11-12]. Dostupné z: <https://www.3dhubs.com/knowledgebase/introduction-fdm-3d-printing>
- [12] KERNS, Jeff. What'stheDifferenceBetweenStereolithography and Selective Laser Sintering?. *MachineDesign* [online]. 2015 [cit. 2018-11-12]. Dostupné z: <https://www.machinedesign.com/3d-printing/what-s-difference-between-stereolithography-and-selective-laser-sintering>

- [13] VAROTSIS, AlkaiosBournias. Introduction to SLA 3DPrinting. *3DHUBS* [online]. [cit. 2018-11-15]. Dostupné z: <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/introduction-sla-3d-printing>
- [14] VAROTSIS, AlkaiosBournias. Introduction to SLS 3DPrinting. *3DHUBS* [online]. [cit. 2018-11-16]. Dostupné z: <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/introduction-sls-3d-printing>
- [15] *RepRap* [online]. [cit. 2018-11-18]. Dostupné z: <https://reprap.org/wiki/RepRap>
- [16] YUSUF, Bulent. 3DPrintersExplained: Delta, Cartesian, Polar,Scara. *All3DP* [online]. [cit. 2018-11-22]. Dostupné z: <https://all3dp.com/know-your-fdm-3d-printers-cartesian-delta-polar-and-scara/>
- [17] 3Dprinting technology – Delta versus Cartesian. *TRACTUS 3D* [online]. [cit. 2018-11-20]. Dostupné z: <https://tractus3d.com/what-is-3d-printing/3d-printing-technology/>
- [18] JORGENSEN, Logan. How to ChooseBetweenCartesian and Delta 3DPrinters. *FARGO 3D PRINTING* [online]. 2017 [cit. 2018-11-20]. Dostupné z: <https://www.fargo3dprinting.com/choose-cartesian-delta-3d-printers/>
- [19] SCHMITT, Betina Madeira, Christiano Fraga ZIRBES, Cassiano BONIN, Daniel LOHMANN, DiovaniCastoldi LENCINA a Aurélio da Costa Sabino NETTO. A Comparative Study ofCartesian and Delta 3DPrinters on Producing PLA Parts. *SciELO* [online]. [cit. 2018-12-09]. Dostupné z: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1516-14392017000800883
- [20] Ultimate3DPrintingMaterialsGuide. *SIMPLIFY3D* [online]. [cit. 2018-11-26]. Dostupné z: <https://www.simplify3d.com/support/materials-guide/>
- [21] MATERIÁLOVÝ SLOVNÍK. *MATERIALPRO 3D* [online]. [cit. 2018-11-26]. Dostupné z: <https://www.materialpro3d.cz/materialovy-slovník/>
- [22] 3DPrintingMaterialsGuide. *3DPRINTING.COM* [online]. [cit. 2018-11-26]. Dostupné z: <https://3dprinting.com/materials/>
- [23] *Indiamart* [online]. [cit. 2018-12-01]. Dostupné z: <https://www.indiamart.com/-proddetail/3d-printer-filament-pla-6871326391.html>
- [24] HALLIDAY, David, Robert RESNICK a Jearl WALKER. *Fyzika: vysokoškolská učebnice obecné fyziky*. Brno: VUTIUM, 2000. Překlady vysokoškolských učebnic. ISBN 80-214-1869-9.
- [25] VYROUBAL, Petr a Jiří MAXA. *Trojrozměrné modelování a simulace MTMS* [skripta]. Brno: Vysoké učení technické v Brně [cit. 2019-05-06].
- [26] Mechanisms of Heat Transfer. *SOLIDWORKS Help* [online]. [cit. 2019-05-07]. Dostupné z: http://help.solidworks.com/2018/english/SolidWorks/cworks/c_Mechanisms_of_Heat_Transfer.htm?id=c4dde0c0cf584e8fa6902b110f7b8b30#Pg0

- [27] ATmega2560 Arduino Mega 2560 EvaluationBoard. *Digi-Key* [online]. [cit. 2018-12-12]. Dostupné z: https://www.digikey.cz/catalog/en/partgroup/atmega-2560-arduino-mega-2560-evaluation-board/18338?utm_adgroup=Development%20Boards&slid=&gclid=EAIaIQobChEAIaIQobCh3wIVRud3Ch2xuAFVEAAAYASAAEgJBnPD_BwE
- [28] 3D PrinterKit Mega 2560. *Ebay* [online]. [cit. 2018-12-12]. Dostupné z: <https://www.ebay.com/-itm/3D-Printer-Kit-Mega-2560-RAMPS-1-4-4X-A4988-for-Arduino-Prusa-i3-RepRap-/272345013133>
- [29] STM32F103VE: ARM Cortex-M3 MCU. *STMicroelectronics* [online]. [cit. 2019-05-06]. Dostupné z: <https://www.st.com/en/microcontrollers-microprocessors/stm32f103ve.html#>
- [30] Smoothieboard. Filafarm [online]. [cit. 2019-04-30]. Dostupné z: <https://www.filafarm.de/products/smoothieboard?variant=863033223>
- [31] Makerbase MKS: MKS Robin Nano Motherboard Manual. *GitHub: makerbase-mks/Datasheet* [online]. 13.10.2018 [cit. 2019-04-20]. Dostupné z: <https://github.com/makerbase-mks/Datasheet/tree/master/English%20datasheet>
- [32] Stepper motor driver. *RepRap* [online]. [cit. 2018-12-12]. Dostupné z: https://reprap.org/wiki/Stepper_motor_driver
- [33] Stepper Motor Drivers. *Pololu: Robotics&Electronics* [online]. [cit. 2018-12-12]. Dostupné z: <https://www.pololu.com/category/120/stepper-motor-drivers>
- [34] Motorový driver TMC2130 s SPI. *UŽITEČNOSTI.CZ* [online]. [cit. 2019-05-01]. Dostupné z: <https://www.uzitecnosti.cz/Motorovy-driver-TMC-2130>
- [35] MechanicalEndstop. *RepRap* [online]. [cit. 2018-12-12]. Dostupné z: https://reprap.org/wiki/Mechanical_Endstop
- [36] Whichendstops are most precise?. *StackExchange: 3D Printing Beta* [online]. [cit. 2018-12-12]. Dostupné z: <https://3dprinting.stackexchange.com/questions/1109/which-endstops-are-most-precise>
- [37] Endstops. *Marlin* [online]. [cit. 2018-12-12]. Dostupné z: <http://marlinfw.org/docs/hardware/endstops.html>
- [38] TypesofEndstops. *Toglefritz'sLair* [online]. 2015 [cit. 2018-12-12]. Dostupné z: <https://toglefritz.com/types-of-endstops/>
- [39] Category:Extruders. *RepRap* [online]. [cit. 2018-12-12]. Dostupné z: <https://reprap.org/wiki/Category:Extruders>
- [40] DE BRUIJN, Erik. Erik'sBowden Extruder. *RepRap* [online]. [cit. 2018-12-12]. Dostupné z: https://reprap.org/wiki/Erik%27s_Bowden_Extruder
- [41] Extruder: essential part of a 3D Printer. *Sculpteo* [online]. [cit. 2018-12-12]. Dostupné z: <https://www.sculpteo.com/en/glossary/extruder-definition/>

- [42] SWMAKER MK8 bowden extruder kit + V6 bowdenhotendprintheadkitprintnozzle M6 fittings 0.4mm forReprap 3D printer 1.75mm. *AliExpress* [online]. [cit. 2018-12-12]. Dostupné z: <https://www.aliexpress.com/item/SWMAKER-MK8-bowden-extruder-kit-V6-bowden-hotend-print-head-kit-print-nozzle-M6-fittings-0/32834556472.html>
- [43] Mosfet 25 A pro 3D tiskárny. *UŽITEČNOSTI.CZ* [online]. [cit. 2019-04-20]. Dostupné z: <https://www.uzitecnosti.cz/Mosfet-25-A-pro-3D-tiskarny-d216.htm>
- [44] TMC2130 SILENTSTEPSTICK SPI: BiPolar Stepper 960mA @ 5.5 ~ 46V. *Digi-Key* [online]. [cit. 2019-04-20]. Dostupné z: <https://www.digikey.no/reference-designs/en/motor-control/2278>
- [45] 42 stepping motor CNC engraving machine 3D printer motor 40mm 42HB40-401A. *AliExpress* [online]. [cit. 2019-05-07]. Dostupné z: <https://www.aliexpress.com/item/42-stepping-motor-CNC-engraving-machine-3D-printer-motor-40mm-42HB40-401A/32830048720.html>
- [46] ZF Electronics DB1C-A1LB. *Digi-Key* [online]. [cit. 2019-05-07]. Dostupné z: <https://www.digikey.com/product-detail/en/zf-electronics/DB1C-A1LB/CH884-ND/412581>
- [47] Indukční čidlo LJ12A3-4-Z/BX, M12, 0-4 mm, NPN/NO, kabel. *GM electronic* [online]. [cit. 2019-04-20]. Dostupné z: <https://www.gme.cz/indukcni-cidlo-lj12a3-4-z-bx-m12-0-4-mm-npn-no-kabel>
- [48] TMC2130-LA DATASHEET. *Trinamic* [online]. [cit. 2019-05-10]. Dostupné z: https://www.trinamic.com/fileadmin/assets/Products/ICs_Documents/TMC2130_datasheet.pdf

Seznam symbolů, veličin a zkratek

3D	3 Dimensional
α [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}$]	Součinitel přestupu tepla
A [m^2]	Plocha, oblast
ABS	Akrylonitril butadien styren
BJ	Binder Jetting
c [$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$]	Měrná tepelná kapacita
CAD	Počítačem podporované navrhování
CAN	Controller Area Network – sběrnice
CD	Compact Disk – Kompaktní disk
d [m]	Průměr
DIR	Výběr směru
DMLS	Direct Metal Laser Sintering
ε [-]	Emisivita
EEPROM	Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory
FDM	FuseDeposition Modeling
FFC	Flexible flat cable (flexibilní plochý kabel)
FFF	Fused Filament Fabrication
FLASH	Nevolatilní přepisovatelná paměť
GND	Ground
I [A]	Elektrický proud
I ² C	Inter-Integrated Circuit – počítačová sériová sběrnice
K [$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}$]	Tepelná vodivost
LCD	Liquid Crystal Display
LOM	Laminace vrstev
m [kg]	Hmotnost
MJ	Material Jetting
N, n [-]	Počet
P [W]	Tepelný tok, výkon
PC	Polykarbonát, personal computer

PET	Polyethylentereftalát
PETG	Polyethylentereftalát-glykol
PID	Proportional Integral Derivative
PLA	Kyselina Polymléčná
PP	Polypropylen
PWM	Pulse Width Modulation
RAMPS	RepRap Arduino Mega Pololu Shield
Q [J]	Teplot
σ [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-4}$]	Stefanova-Boltzmanova konstanta
S [m^2]	Plocha
SD	Secure Digital (Standart paměťových karet)
SLA	Stereolitografie
SLM	Selective Laser Melting
SLS	Selective Laser Sintering
SPI	Serial Peripheral Interface – sériové periferní rozhraní
SRAM	Static Random Access Memory
STEP	Krok
.STL	Stereolitography file
T [$^{\circ}\text{C}$, K]	Teplota
U [V]	Elektrické napětí
UART	Universal Asynchronous Receiver-Transmitter
USB	Universal Serial Bus
UV	Ultrafialové záření (Ultraviolet)
Wi-Fi	Bezdrátová komunikační síť

Seznam obrázků

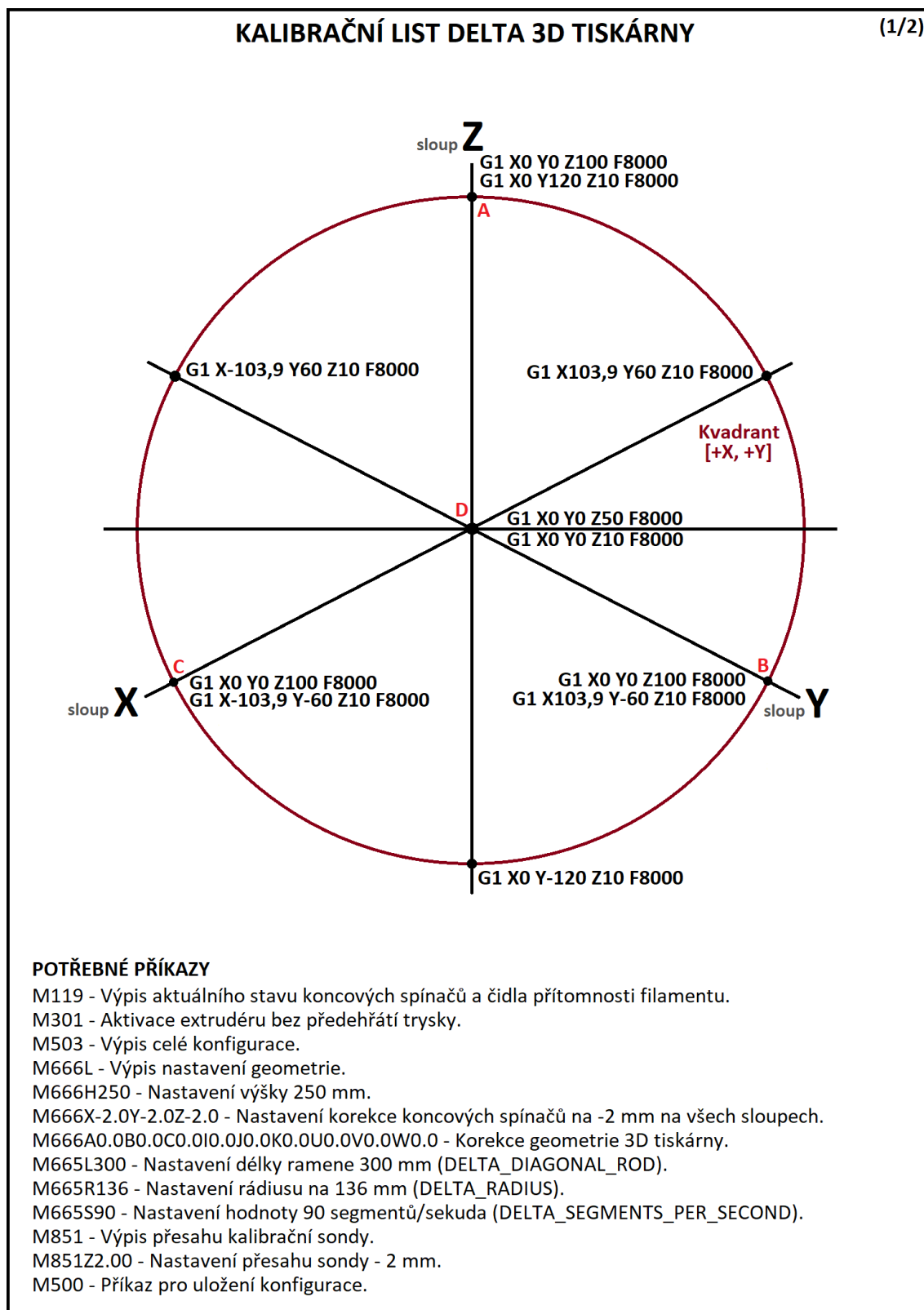
Obr. 1: Příklad odvětví, v nichž se používá 3D tisk.	12
Obr. 2: Postup výroby pomocí 3D tisku.	13
Obr. 3: Princip metody FDM. [10]	14
Obr. 4: Princip metody SLA. [12]	15
Obr. 5: Princip metody SLS. [12]	16
Obr. 6: Kartézský typ 3D tiskárny. [19]	18
Obr. 7: Delta 3D tiskárna. [19]	19
Obr. 8: Polar 3D tiskárny R-360. [15]	20
Obr. 9: Scara 3D tiskárna Morgan Pro 2. [15].....	21
Obr. 10: Příklad navinutých tiskových strun (filamentu). [23].....	22
Obr. 11: Vývojová deska Arduino Mega 2560 a rozšiřující deska RAMPS. [28]	28
Obr. 12: Řídící deska Smoothieboard. [30]	29
Obr. 13: Koncové spínače používané u 3D tiskáren. [37]	31
Obr. 14: Příklad tiskové hlavy s bowdenem. [42]	32
Obr. 15: Schéma postupu návrhu a výroby delta 3D tiskárny.	33
Obr. 16: Vytvořený (vlevo) a vyrenderovaný (vpravo) 3D model delta 3D tiskárny. ...	34
Obr. 17: Blokové schéma elektroniky zkonstruované delta 3D tiskárny.	36
Obr. 18: Řídící deska MKS Robin Nano [31].	37
Obr. 19: MOSFET modul. [43]	39
Obr. 20: Použitý ovladač krokového motoru TMC2130. [34]	40
Obr. 21: Obvodové zapojení ovladače krokového motoru TMC2130. [44].....	41
Obr. 22: Mechanický spínač vlevo, indukční snímač a jeho zapojení vpravo. [46, 47].	41
Obr. 23: 3D model krabičky na elektroniku.	42
Obr. 24: Fotografie sestavené krabičky pro elektroniku.....	42
Obr. 25: Kompletní 3D model tiskové hlavy (vlevo) a její řez (vpravo).....	43
Obr. 26: P-Q křivka ventilátoru FD2140.	44
Obr. 27: Teploty tiskové hlavy bez použití ventilátorů.	45
Obr. 28: Teploty tiskové hlavy s ventilátory (vlevo), proudění vzduchu (vpravo).	45
Obr. 29: Návrh vyhřívané podložky – spirálová bifilární.....	47
Obr. 30: Návrh vyhřívané podložky – zónová.....	48
Obr. 31: Návrh vyhřívané podložky – polygonní.	48
Obr. 32: Negativní film. předloha (vlevo) a vyrobená vyhřívaná podložka (vpravo). ...	49
Obr. 33: Sestava kompletní tiskové podložky.	49
Obr. 34: Sestavení rámu delta 3D tiskárny.	50
Obr. 35: Sestavená tisková hlavy (vlevo) a extrudér (vpravo).	51
Obr. 36: Detail spodní části (vlevo) a kompletní delta 3D tiskárna (vpravo).....	51
Obr. 37: Výkres hlavní sestavy delta 3D tiskárny.	52
Obr. 38: Nákres rozměrů delta 3D tiskárny potřebných pro konfigurační soubor.	53
Obr. 39: Nastavení aplikace Repetier – připojení 3D tiskárny.	55
Obr. 40: Nastavení aplikace Repetier – parametry 3D tiskárny.	56

Obr. 41: Nastavení aplikace Repetier – parametry extrudéru.....	57
Obr. 42: Nastavení aplikace Repetier – nastavení tiskové plochy.....	57
Obr. 43: Zkušební výtisk kalibrační lodičky.	59
Obr. 44: Průběhy teplot a dodávaných výkonů z aplikace Repetier.	59
Obr. 45: Tisková hlava nasnímána termokamerou.	60
Obr. 46: Vyhřívaná tisková podložka nasnímána termokamerou.....	61
Obr. 47: Teplotní simulace (vlevo) a sestavená a oživená delta 3D tiskárna (vpravo). .	62
Obr. 48: Kalibrační list delta 3D tiskárny – list 1.....	74
Obr. 49: Kalibrační list delta 3D tiskárny – list 2.....	75
Obr. 50: Seznam tištěných dílů pro výrobu delta 3D tiskárny – část 1.	76
Obr. 51: Seznam tištěných dílů pro výrobu delta 3D tiskárny – část 2.	77

Seznam tabulek

Tab. 1: Shrnutí výhod a nevýhod 3D tisku.	12
Tab. 2: Porovnání vlastností základních materiálů pro FDM 3D tisk. [20].....	24
Tab. 3: Příklad používaných ovladačů krokových motorů u 3D tiskáren. [33, 34].....	30
Tab. 4: Srovnání řídicích desek [27, 29].....	39
Tab. 5: Nastavení simulace – tisková hlava.....	44
Tab. 6: Nastavené materiály jednotlivých částí tiskové hlavy.....	44
Tab. 7: Nastavení simulace – vyhřívané podložky.	46
Tab. 8: Nastavené materiály jednotlivých částí vyhřívaných podložek.	46
Tab. 9: Parametry navržených vyhřívaných podložek.....	47
Tab. 10: Souhrn cen použitého materiálu pro výrobu delta 3D tiskárny.....	63
Tab. 11: Seznam ostatních dílů potřebných pro výrobu delta 3D tiskárny – část 1.	78
Tab. 12: Seznam ostatních dílů potřebných pro výrobu delta 3D tiskárny – část 2.	79

A Kalibrační list delta 3D tiskárny



Obr. 48: Kalibrační list delta 3D tiskárny – list 1.

KALIBRAČNÍ LIST DELTA 3D TISKÁRNY

(2/2)

A) Kalibrace extrudéru

Opakování	Vypočtený počet kroků / 100 mm*

* = $100 \cdot (\text{aktuální počet kroků}) / (\text{naměřená délka})$

B) Kalibrace tiskové plochy a základní delta geometrie

Opakování	Výška nad podložkou A (mm)	Výška nad podložkou B (mm)	Výška nad podložkou C (mm)	Výška nad podložkou D (mm)

Umístění kalibračních bodů **A, B, C, D** viz kalibrační list delta 3D tiskárny (1/2).

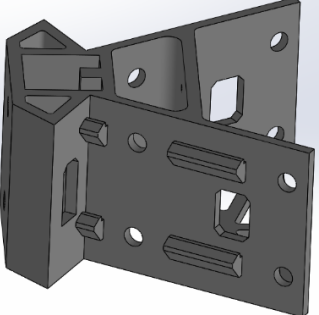
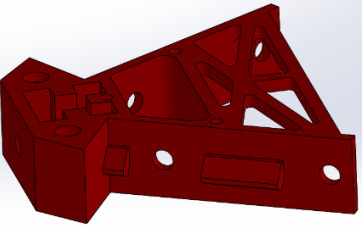
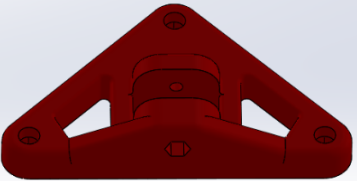
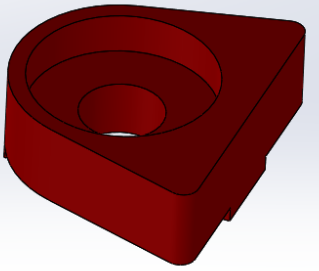
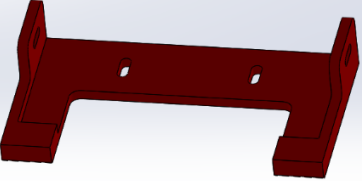
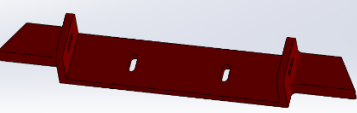
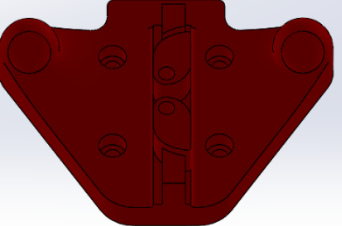
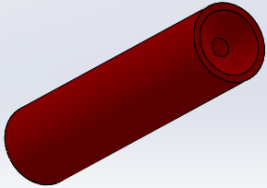
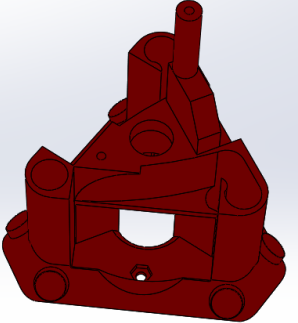
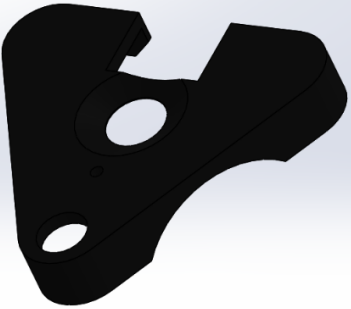
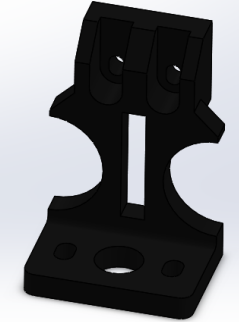

Opakování	Nastavení koncových spínačů (M666XYZ)	Rádus R (mm)	Délka ramen L (mm)	Výška H (mm)
1	M666 X-0.0Y-0.0Z-0.0	135	299	271

C) Kalibrace Z-sondy

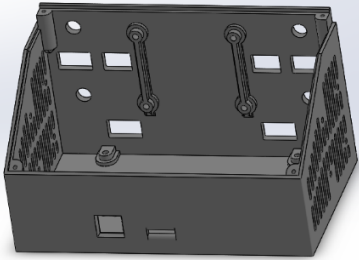
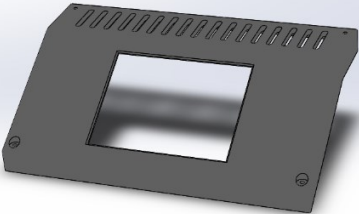
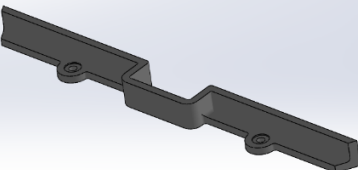
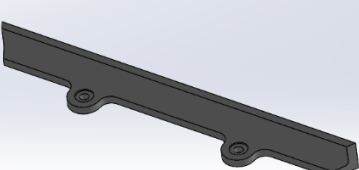
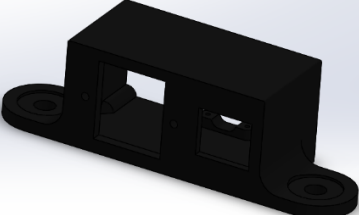
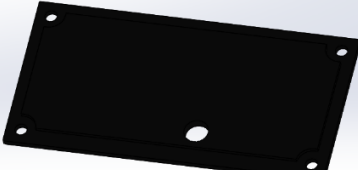
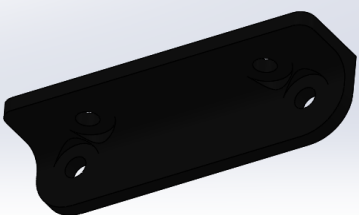
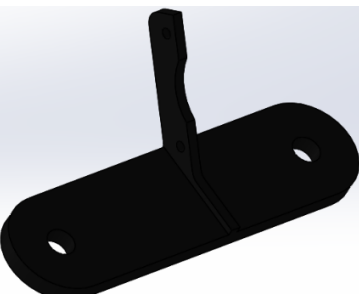
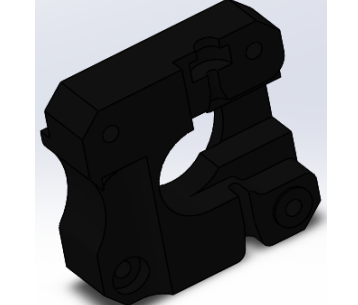
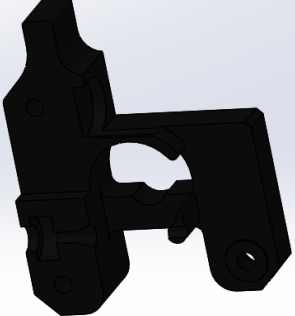
Opakování	Vzdálenost konce Z-sondy od konce trysky - přesah (mm)

Obr. 49: Kalibrační list delta 3D tiskárny – list 2.

B Seznam tištěných dílů a rozpiska materiálu

		
Roh spodní (3x)	Roh horní (3x)	Napínák řemenu (3x)
		
Zakončení vedení (3x)	Držák zdroje přední (1x)	Držák zdroje zadní (1x)
		
Držák ramen (3x)	Zakončení ramene (12x)	Tělo tiskové hlavy (1x)
		
Kryt těla tiskové hlavy (1x)	Držák Z-sondy (1x)	Držák špulky – rameno (2x)

Obr. 50: Seznam tištěných dílů pro výrobu delta 3D tiskárny – část 1.

		
Krabice pro elektroniku (1x)	Víko krabice pro el. (1x)	Kryt podložky dlouhý (3x)
		
Kryt podložky krátký (3x)	Síťová zásuvka (1x)	Kryt síťové zásuvky (1x)
		
Držák extrudéru L (1x)	Držák motoru extrudéru (1x)	Extrudér – díl 1 (1x)
		
Extrudér díl 2 (1x)		

Obr. 51: Seznam tištěných dílů pro výrobu delta 3D tiskárny – část 2.

Tab. 11: Seznam ostatních dílů potřebných pro výrobu delta 3D tiskárny – část 1.

Položka	Množství
Řídicí deska MKS Robin Nano + 3,2“ displej	1 kus
Ovladač krokového motoru TMC2130	4 kusy
MOSFET modul	1 kus
Napájecí zdroj 360 W	1 kus
Krokový motor 42HB40-401A	4 kusy
Spínač DB1C-A1LB	4 kusy
Indukční Z-sonda LJ12A3-4-Z/BY	1 kus
Relé 12 V, 40 A	1 kus
Euro zásuvka GSI-2 včetně trubičkové pojistky 2 A	1 kus
Kolébkový spínač P-H8653VB01R	1 kus
Ventilátor 40x 40 mm, FD2140	2 kusy
Kabel 230 V (CYSY 3x 1,5 mm)	60 cm
Konektor XT60 zásuvka + zástrčka (sada)	1 kus
Sady konektorů DuPont a NXG	---
Kabel průřez 2,5 mm ² (délky: černý 100 cm, červený 100 cm)	200 cm
Kabel průřez 1,5 mm ² (délky: modrý 250 cm, červený 250 cm)	500 cm
Kabel průřez 0,22 mm ² (délky: černá 10 m, červená 10 m, bílá 5 m)	25 metrů
Termistor NTC 100 kΩ	2 kusy
Elektroinstalační příslušenství (smršťovací bužírky, stahovací pásy atd.)	---
Sada: tryska 0,4 mm, chladič, oddělovač konců, teflonová vložka, topné těleso 12 V/ 40 W a přenašeč tepla. (6 položek)	1 kus
Neodymový magnet N48, průměr 8 mm délka 20 mm	12 kusů
Ložisková kulička, průměr 10 mm	12 kusů
Řemenice GT2 16 zubů	3 kusy
Řemenice GT2 (jako 16 zubů ale hladká)	3 kusy
Řemen GT2 o šířce 6 mm	450 cm
Podávací kolečko MK8	1 kus
Lineární vedení včetně vozíku MGN12	3 kusy
Hliníkový profil 30x30x745 mm	3 kusy
Hliníkový profil 30x30x322 mm	9 kusů
Hliníková trubička, průměr 8 mm, šířka stěny 1 mm, délka 249 mm	6 kusů
Hliníková deska 40x 40 cm o tloušťce 2 mm	1 kus
Hliníkový substrát pro výrobu vyhřívané podložky, tloušťka 2 mm, tloušťka mědi 35 μm, rozměry 40x 40 cm.	1 kus
Plastová trubka průměr 32 mm, délka 150 mm	1 kus
Bowden pro filament 1,75 mm	1 metr
Bowdenová spojka	2 kusy
Ložisko 625ZZ	1 kus

Tab. 12: Seznam ostatních dílů potřebných pro výrobu delta 3D tiskárny – část 2.

Položka	Množství
Profilová matice M8	70 kusů
Samojistná matice M8	2 kusy
Šroub Button M8x25	2 kusy
Šroub Button M8x10	70 kusů
Podložka M8	14 kusů
Šroub M5x 25, válcová hlava, inbus.	9 kusů
Matice M5	9 kusů
Šroub M4x 8, válcová hlava, inbus.	9 kusů
Podložka M4	9 kusů
Distanční sloupek M3x 12 mm	6 kusů
Profilová matice M3	21 kusů
Sada: šrouby M3 inbus, matice M3 a podložky M3	---
Sada: šrouby M2,5 inbus, matice M2,5 a podložky M2,5	---
Mechanické příslušenství	---